

# Technologiebericht

## 2.4 CO<sub>2</sub>-Nutzung

### innerhalb des Forschungsprojekts TF\_Energiewende

---

Dr. Alexander Otto

Dr. Peter Markewitz

Dr. Martin Robinius

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages



**Disclaimer:**

Das diesem Bericht zugrunde liegende Forschungsvorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen 03ET4036A-C durchgeführt. Die Verantwortung für den Inhalt dieses Berichts liegt bei den Autoren und Autorinnen.

**Bitte den Bericht folgendermaßen zitieren:**

Otto, A.; Markewitz, P.; Robinius, M. (2017): Technologiebericht 2.4 CO<sub>2</sub>-Nutzung. In: Wuppertal Institut, ISI, IZES (Hrsg.): Technologien für die Energiewende. Teilbericht 2 an das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi). Wuppertal, Karlsruhe, Saarbrücken.

**Hinweis:**

Die multi-kriterielle Bewertung und generell die Erstellung dieses Berichts basiert auf den Vorgaben, die in Teilbericht 1 beschrieben sind:

Viebahn, P.; Kobiela, G.; Soukup, O.; Wietschel, M.; Hirzel, S.; Horst, J.; Hildebrand, J. (2017): Technologien für die Energiewende. Teilbericht 1 (Kriterienraster zur Bewertung der Technologien innerhalb des Forschungsprojekts TF\_Energiewende) an das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi). Wuppertal Institut, Fraunhofer ISI, IZES: Wuppertal, Karlsruhe, Saarbrücken.

**Kontakt:**

Dr. Peter Markewitz

Tel.: +49 2461/61-6119

Fax: +49 2461/61-6695

E-Mail: [p.markewitz@fz-juelich.de](mailto:p.markewitz@fz-juelich.de)

Forschungszentrum Jülich GmbH

Institut für Elektrochemische Verfahrenstechnik (IEK-3)

52425 Jülich

**Review durch:**

Karin Arnold (Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH)

## Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>3</b>
<b>Verzeichnis von Abkürzungen, Einheiten und Symbolen</b>	<b>4</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>5</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>6</b>
<b>Zusammenfassung (Steckbrief)</b>	<b>7</b>
<b>1 Beschreibung des Technologiefeldes</b>	<b>9</b>
1.1 Technologieauswahl	10
1.2 Kurzbeschreibung und Entwicklungsstand von Möglichkeiten der chemischen Nutzung von CO <sub>2</sub>	12
1.3 Geförderte Forschungsprojekte zur chemischen Nutzung von CO <sub>2</sub>	15
<b>2 Entwicklungsbedarf für die chemische industrielle CO<sub>2</sub>- Nutzung</b>	<b>17</b>
2.1 Grundlagen der chemischen CO <sub>2</sub> -Nutzung	17
2.2 Entwicklungsbedarf	19
<b>3 Relevanz öffentlicher Förderung</b>	<b>21</b>
3.1 Kriterium 1: Vorlaufzeiten	21
3.2 Kriterium 2: Forschungs- und Entwicklungsrisiken (technisch, wirtschaftlich, rohstoffseitig)	21
<b>4 Detaillierte Bewertung des Technologiefeldes</b>	<b>24</b>
4.1 Kriterium 3: Marktpotenziale	24
4.2 Kriterium 4: Beitrag zu Klimazielen und weiteren Emissionsminderungszielen	24
4.3 Kriterium 5: Beitrag zur Energie- und Ressourceneffizienz	27
4.4 Kriterium 6: Kosteneffizienz	27
4.5 Kriterium 7: Inländische Wertschöpfung	27
4.6 Kriterium 8: Stand und Trends von F&E im internationalen Vergleich	28
4.7 Kriterium 9: Gesellschaftliche Akzeptanz	29
4.8 Kriterium 10: Unternehmerisch-technische Pfadabhängigkeit und Reaktionsfähigkeit	29
4.9 Kriterium 11: Abhängigkeit von Infrastrukturen	29
4.10 Kriterium 12: Systemkompatibilität	30
<b>5 F&amp;E-Empfehlungen für die öffentliche Hand</b>	<b>31</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>33</b>

## Verzeichnis von Abkürzungen, Einheiten und Symbolen

### Abkürzungen

BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
EOR	Enhanced Oil recovery
EU	Europäische Union
IEA	Internationale Energieagentur
PUR	Polyurethan
SOEC	Solid oxide electrolyser cell
TERM	BMBF Projekt Technologien zur Erschließung der Ressource Mikroalgen

### Einheiten und Symbole

%	Prozent
€	Euro
°C	Grad Celsius
km	Kilometer
bar	Druck
t	Tonne
K	Kelvin
kJ	Kilojoule
T	Temperatur


## Tabellenverzeichnis

Tab. 1-1	Übersicht zur Einordnung der betrachteten Technologien in den Gesamtkontext -----	10
Tab. 1-2	Globales Produktionsvolumen industriell hergestellter organischer Produkte mittels CO <sub>2</sub> als Rohstoff sowie die jeweils gebundene Masse an Kohlendioxid pro kg Produkt und insgesamt pro Stoff-----	12
Tab. 1-3	Ausgewählte nationale Förderprojekte zur chemischen Nutzung von CO <sub>2</sub> -----	16
Tab. 2-1	Mögliche Stoffgruppen der Reaktionen mit CO <sub>2</sub> in Abhängigkeit der Art des Reaktionspartners -----	18
Tab. 3-1	Vorlaufzeiten bis zur Kommerzialisierung der chemischen Nutzung von CO <sub>2</sub> (Bulkchemikalien, Polymere)-----	21
Tab. 3-2	Aktuelles Entwicklungsstadium des Technologiefeldes chemische Nutzung von CO <sub>2</sub> -----	22
Tab. 3-3	Bewertung technischer und wirtschaftlicher Forschungs- und Entwicklungsrisiken in Zusammenhang mit Technologiefeld chemische Nutzung von CO <sub>2</sub> -----	23
Tab. 4-1	CO <sub>2</sub> -Einsatzpotenziale für Polymere und Bulkchemikalien -----	26
Tab. 4-2	Polymerproduktion in Deutschland 2015 -----	28
Tab. 4-3	Abhängigkeit des Technologiefeldes CO <sub>2</sub> -Nutzung von Infrastrukturen-----	29

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 1-1	Mögliche Pfade zur CO <sub>2</sub> -Nutzung -----	9
Abb. 1-2	Kolbe-Schmidt-Synthese von Salicylsäure -----	13
Abb. 1-3	Synthese von Ethylencarbonat (mit R: H) und Propylencarbonat (mit R: CH <sub>3</sub> ) über CO <sub>2</sub> und Ethylenoxid (mit R: H) bzw. Propylenoxid (mit R: CH <sub>3</sub> ). Kolbe-Schmidt-Synthese von Salicylsäure -----	14
Abb. 1-4	Vereinfachte Darstellung des Asahi Kasei Prozesses zur phosgenfreien Herstellung von Bisphenol-A-Polycarbonat aus Ethylenoxid, Bisphenol-A und CO <sub>2</sub> -----	14
Abb. 1-5	Synthese von Polypropylencarbonat aus CO <sub>2</sub> und Propylenoxid -----	15
Abb. 1-6	Herstellung von Polyurethanen aus CO <sub>2</sub> -basierten Diolen und Diisocyananten -----	15
Abb. 2-1	Energiediagramm für organische Synthesen von CO <sub>2</sub> mit hochenergetischen Reaktanden zu Produkten mit niedrigem Energieniveau -----	17

## Zusammenfassung (Steckbrief)

<b>Technologiefeld Nr. 2.4</b> <b>CO<sub>2</sub>-Nutzung</b>													
<b>A) Beschreibung des Technologiefeldes und F&amp;E-Bedarf</b>													
<b>Beschreibung des Technologiefeldes</b>													
Technologiefeld bestehend aus 2 zentralen Technologiegruppen: – Bulkchemikalien – Polymere (chemische Nutzung von CO <sub>2</sub> ) Andere CO <sub>2</sub> Nutzungen werden in den Technologiefeldern 4.2a: Power-to-gas (Methanisierung chemisch-katalytisch)), 4.2b: Power-to-gas (Methanisierung biologisch) und 4.3: Power-to-liquids/chemicals analysiert													
Technologische Reife: – Photokatalytische Aktivierung: Technologieentwicklung (TRL=3); elektrokatalytische Aktivierung von CO <sub>2</sub> : Technologieentwicklung (TRL=4) – C1 Baustein für Polymere (außer PUR): Technologieentwicklung (TRL=3-4) – Hydrierung von CO <sub>2</sub> : Je nach Anwendung Technologieentwicklung – Kommerzialisierung (TRL=4-9)													
Kritische Komponenten – Katalysatoren – Gesamte verfahrenstechnische Wertschöpfungskette													
<b>Entwicklungsziele</b> – Identifikation und Bewertung von möglichen Polymerprodukten hinsichtlich Relevanz (Klimareduktionsbeitrag, Fixierungsdauer etc.) – Versuchs- und Demonstrationsanlagen													
<b>Technologie-Entwicklung</b>													
Mögliche CO <sub>2</sub> Einsatzpotenziale <sup>1)</sup>													
	<table><tr><th></th><th>National<sup>2)</sup></th><th>EU</th></tr><tr><td>Polymere</td><td>15 Mio. t</td><td>40 Mio. t</td></tr><tr><td>Harnstoffsynthese</td><td>Keine Angabe</td><td>40 Mio. t</td></tr><tr><td>Sonstige Bulkchemikalien</td><td>Keine Angabe</td><td>20 Mio. t</td></tr></table>		National <sup>2)</sup>	EU	Polymere	15 Mio. t	40 Mio. t	Harnstoffsynthese	Keine Angabe	40 Mio. t	Sonstige Bulkchemikalien	Keine Angabe	20 Mio. t
	National <sup>2)</sup>	EU											
Polymere	15 Mio. t	40 Mio. t											
Harnstoffsynthese	Keine Angabe	40 Mio. t											
Sonstige Bulkchemikalien	Keine Angabe	20 Mio. t											
<sup>1)</sup> Theoretische Potenziale, basieren auf heutigen Produktionsmengen <sup>2)</sup> CO <sub>2</sub> -Einsatz für die Herstellung chemischer Produkte wird in aktuellen Klimagasszenarien nicht thematisiert.													
<b>F&amp;E-Bedarf</b> – Katalysatorentwicklung (Ziele: Erhöhung des Reaktionsumsatzes, hohe Selektivitäten, Stabilität gegenüber Verunreinigungen) – Abschätzungen von CO <sub>2</sub> -Einsatzpotenzialen – Bewertung und Einordnung sowie Vergleich von Produkten: Herkömmliche Verfahren vs. C1-Verfahren: Lebenszyklusanalysen, Kostenabschätzungen – Verfahrenstechnische Auslegung von heute im Labormaßstab befindlichen Technologien – Direkte Synthetisierung von Polymeren – Verfahren zur Aktivierung von CO <sub>2</sub> – Produktbezogene Akzeptanzforschung													

<b>B) Multikriterielle Bewertung</b>	
<b>Beitrag zu Klimazielen und weiteren Emissionsminderungszielen</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>– Ressourceneinsparung durch den Einsatz von CO<sub>2</sub></li> <li>– Aussagen zur Klimagas-minderung sind derzeit sehr unsicher, da produktspezifische Life Cycle Analysen in vielen Fällen nicht vorliegen</li> <li>– Feinchemikalien: keine signifikantes CO<sub>2</sub>-Einsatzpotenzial und somit kein nennenswertes Klimagasreduktionspotenzial</li> </ul>	
<b>Beitrag zur Energie- und Ressourceneffizienz</b>	
Keine Angabe möglich (erfordert produktspezifische LCA-Bewertungen)	
<b>Kosteneffizienz</b>	
<p>Pauschale Angabe nicht möglich, da von vielen Parametern abhängig (z. B. Eduktpreise, H<sub>2</sub>-Preis etc.). Notwendige Voraussetzung für einen zukünftigen Einsatz: Kostenvorteil gegenüber konventionellen Herstellverfahren.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Methanolherstellung: CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten ca. 500 €/t CO<sub>2</sub>.</li> <li>– Dimethylesterherstellung: CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten ca. 440 €/t CO<sub>2</sub></li> </ul>	
<b>Inländische Wertschöpfung</b>	
<p>Netto-Produktionswert der deutschen Polymerherstellung in 2015: 27,8 Mrd. €, Beschäftigte: 57.500 (entspricht einem Anteil von 19,6 % am gesamten Produktionswert der chemischen Industrie)</p> <p>Heutiger Weltmarktanteil von Deutschland an der Polymerproduktion: 5-6 %</p>	
<b>Stand und Trends von F&amp;E im internationalen Vergleich</b>	
Derzeit weltweite F&E Aktivitäten. Hauptakteure: USA, China, Europa	
<b>Gesellschaftliche Akzeptanz</b>	
Derzeit liegen nur wenige Akzeptanzuntersuchungen für C1-Polymerprodukte vor. Akzeptanzprobleme: Nachhaltigkeit der CO <sub>2</sub> -Einbindung wird angezweifelt, Assoziation: „toxisches“ CO <sub>2</sub>	
<b>Unternehmerisch-technische Pfadabhängigkeit und Reaktionsfähigkeit</b>	
Pfadabhängigkeit ist vergleichbar mit heute üblichen verfahrenstechnischen Anlagen	
<b>Abhängigkeit von Infrastrukturen</b>	
<p>Bei Nutzung</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– großer CO<sub>2</sub>-Mengen: Bau von CO<sub>2</sub>-Pipelines</li> <li>– kleinerer CO<sub>2</sub>-Mengen: Lkw-, Bahn- oder Schiffstransport</li> </ul>	
<b>Systemkompatibilität</b>	
Bei Einsatz von H <sub>2</sub> : Mögliche Synergiepotenziale (als Teil einer Wasserstoffenergiewirtschaft), ggfs. Nutzungskonkurrenzen mit anderen PtX-Anwendungen (z. B. Power-to-Fuel, Methanisierung) in Bezug auf die Verfügbarkeit von „grünem“ H <sub>2</sub>	



## 1 Beschreibung des Technologiefeldes

Die Rolle von CO<sub>2</sub> hat sich in den letzten Jahren stark gewandelt. Während CO<sub>2</sub> überwiegend als Nebenprodukt oder Abfallprodukt aus Industrieprozessen und der Verbrennung von fossilen Rohstoffen galt, kann die stoffliche Nutzung von CO<sub>2</sub> als Rohstoff für Chemikalien, Kunst- und Kraftstoffe die Möglichkeit eröffnen, unabhängiger von fossilen Rohstoffen zu werden.

Kohlendioxid ist als Verbrennungsprodukt von kohlenwasserstoffhaltigen Materialien eine stabile und unreaktive Verbindung. Dennoch ist es möglich, CO<sub>2</sub> mit reaktiven Reaktionspartnern und unter der Hilfe von geeigneten reaktiven Reagenzien und/oder Katalysatoren zu neuen chemischen Verbindungen umzusetzen. Die Konvertierung von Kohlendioxid in höherwertige Produkte kann chemisch, elektrochemisch, biochemisch oder photochemisch erfolgen. Für die Aktivierung des Kohlendioxids ist der Einsatz von Energie notwendig. Abhängig von der Natur des Umwandlungsprozesses erfolgt die Zufuhr der benötigten Energie thermisch, elektrisch, chemisch oder durch Licht (Abb. 1-1).

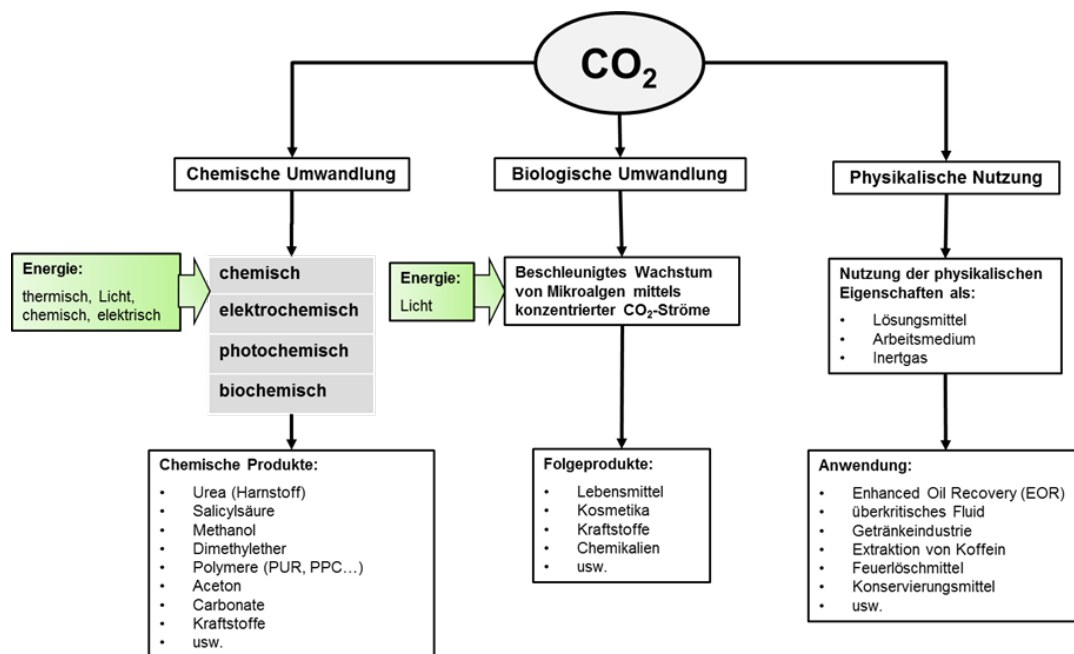


Abb. 1-1 Mögliche Pfade zur CO<sub>2</sub>-Nutzung

Konzentrierte CO<sub>2</sub>-Ströme können auch das Wachstum von Mikroalgen beschleunigen. Dabei wird das CO<sub>2</sub> über Photosynthese in den Mikroalgen gebunden. Aus der so erzeugten Biomasse können anschließend vielseitige Produkte für die Lebensmittel- und Kosmetikindustrie sowie Chemikalien und Kraftstoffe gewonnen werden. Ganz ohne Umwandlungsprozesse kann CO<sub>2</sub> auch aufgrund der physikalischen Eigenschaften direkt als Molekül für technische Anwendungen genutzt werden. Beispiele dafür sind der Einsatz von CO<sub>2</sub> beim *Enhanced Oil Recovery (EOR)*, in der Getränkeindustrie, als Löschmittel und für die Entkoffeinierung von Kaffee (Fischedick, Görner, Thomeczek 2015).

## 1.1 Technologieauswahl

In diesem Bericht wird das Technologiefeld der CO<sub>2</sub>-Nutzung in die Technologiegruppen chemische Nutzung, physikalische Nutzung und biologische Nutzung von CO<sub>2</sub> unterteilt. Weiter betrachtet wird jedoch nur das Technologiefeld der chemischen Nutzung, mit den zugehörigen „Technologien“ Synthese von Bulkchemikalien und Polymeren. Die Nutzung für Kraftstoffe (power-to-liquids), die Nutzung für Chemikalien (power-to-chemicals) sowie die Methanisierung (power-to-gas) werden in den Technologiefeldern 4.3 und 4.2a/4.2b behandelt.

Obwohl die Synthesetechniken weiter in einzelne Reaktionen oder Prozesse, wie die Synthese von Methanol, Harnstoff oder synthetischem Diesel, unterteilt werden können, werden primär diese Prozesse („Technologien“) im Gesamten betrachtet. Für die detaillierte Bewertung in den nachfolgenden Kapiteln werden an geeigneter Stelle, sofern eine allgemeine Bewertung für das Anwendungsgebiet nicht durchgeführt werden kann, beispielhaft einzelne Reaktionen herangezogen. Obwohl auch die Synthese von Feinchemikalien zur chemischen Nutzung von CO<sub>2</sub> gehört, werden diese Prozesse nicht weiter verfolgt. Eine detaillierte Begründung für den Ausschluss von Feinchemikalien erfolgt in den nachfolgenden Ausführungen. Auch wird die Mineralisierung von CO<sub>2</sub> zu Verbindungen wie CaCO<sub>3</sub> nicht betrachtet, da diese im eigentlichen Sinne keine CO<sub>2</sub>-Nutzung darstellt, sondern vielmehr als Speicherung von CO<sub>2</sub> zu verstehen ist.

Tab. 1-1 Übersicht zur Einordnung der betrachteten Technologien in den Gesamtkontext

Technologiebereich	Technologiefeld	Technologiegruppen	Technologieauswahl	Ausgeschlossene Technologien
Konventionelle Kraftwerke	CO <sub>2</sub> -Nutzung	Chemische, physikalische, biologische Nutzung	Synthese von Bulkchemikalien, Polymeren	Feinchemikalien, Methanisierung, Mineralisierung, Mikroalgen EOR

Trotz des Ausschlusses der physikalischen und biologischen Nutzung von CO<sub>2</sub> werden diese Technologien hier kurz beschrieben. Bei der *physikalischen Nutzung* werden weltweit etwa 20 Mio. t CO<sub>2</sub> pro Jahr als Industriegas, Kältemittel, Löschmittel, in der Getränkeindustrie und als Extraktionsmittel eingesetzt. Darüber hinaus finden 40 Mio. t CO<sub>2</sub> pro Jahr in der Petrochemie Anwendung, insbesondere zur Erdölförderung *Enhanced Oil Recovery (EOR)* (Kruse, Kiep, & Schäffner, 2015). Aus klimaspezifischer Sicht ist die physikalische Nutzung nur dann attraktiv, wenn es für Verfahren angewandt wird, die das CO<sub>2</sub> für lange Zeit aus der Atmosphäre fernhalten (z. B. EOR). Ebenso können Anwendungen sinnvoll sein, bei denen Gase substituiert werden, die ein höheres Treibhausgaspotenzial als CO<sub>2</sub> aufweisen. In der Lackmittelindustrie werden beispielsweise Lösungsmittelverfahren entwickelt, die die Substitution von flüchtigen organischen Verbindungen ermöglichen. Abgesehen von diesen speziellen Anwendungen hat die physikalische Nutzung von CO<sub>2</sub> keine Relevanz zur Vermeidung von CO<sub>2</sub>-Emissionen, da das CO<sub>2</sub> im eigentlichen Sinne keine fossilen Rohstoffe substituiert und in den meisten Anwendungsfällen wieder direkt in die

Atmosphäre gelangt. Zwar stellt die Anwendung für EOR hier eine Ausnahme dar, jedoch kann diese Anwendungsmöglichkeit eher zur CO<sub>2</sub>-Speicherung gezählt werden. Im Übrigen besitzt sie für Deutschland keine Relevanz. Des Weiteren ist die physikalische Nutzung von CO<sub>2</sub> bereits etabliert. Sie wird kommerziell eingesetzt, so dass kein F&E-Bedarf mehr besteht.

Neben der chemischen und physikalischen Nutzung kann CO<sub>2</sub> auch zum beschleunigten Wachstum von Mikroalgen eingesetzt werden. Dabei wird das CO<sub>2</sub> über Photosynthese von den Algen aufgenommen und in Biomasse umgewandelt. Der Vorteil von Mikroalgen gegenüber herkömmlichen Landpflanzen ist ein 8- bis 10-mal schnelleres Wachstum, so dass größere Mengen an CO<sub>2</sub> in einem relativ kurzen Zeitraum gebunden werden können.

Ein Beispiel für die kommerzielle Nutzung von CO<sub>2</sub> zur Erzeugung von Mikroalgen wird von BASF Health und Nutrition in Australien betrieben. In offenen Becken mit 10 cm Tiefe wird die Grünalge *Dunaliella salina* angebaut, aus der anschließend  $\beta$ -Carotin gewonnen wird. Dabei nimmt die Grünalge zum Wachstum CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre, aber auch teilweise aus angereicherten CO<sub>2</sub>-Gasströmen auf. Trotz der künstlichen Zugabe von CO<sub>2</sub> beträgt die Raumzeitausbeute nur etwa 3-15 g Biomasse pro m<sup>2</sup> Becken und Tag. Weltweit existieren nur zwei Anlagen, in denen kommerziell Algen (Art: *Chorella vulgaris*) in geschlossenen Photobioreaktoren gezüchtet werden, um anschließend Lebensmittel oder energiereiche Öle für die Treibstoffproduktion herzustellen. In Klötze (Deutschland) betreibt die Roquette Klötze GmbH & Co. KG seit 1999 eine Anlage mit 500 km mineralischen Glasröhren und einem photoaktiven Kultivierungsvolumen von 700.000 Litern. Dabei werden pro Kilogramm Alge vier Kilogramm CO<sub>2</sub> aufgenommen (Roquette 2016). Die zweite Anlage befindet sich in Andalusien (Südspanien) mit einem Rohrsystem von 35 km Länge und einem Kultivierungsvolumen von 85.000 Litern (Kruse et al. 2015). Des Weiteren gibt es zahlreiche Pilot- und Demonstrationsanlagen zum beschleunigten Wachstum von Mikroalgen mittels konzentrierter CO<sub>2</sub>-Ströme. Die aus den Algen gewonnenen Produkte werden hauptsächlich in der Lebensmittelindustrie und zunehmend für die Herstellung von Kraftstoffen und Chemikalien eingesetzt. Beispielsweise betreibt das Unternehmen SUBITEC in Kooperation mit der E.ON Hanse AG im Rahmen des nationalen Forschungsprojektes TERM (Technologien zur Erschließung der Ressource Mikroalgen) eine Pilotanlage in Hamburg sowie mit der Südzucker AG eine Anlage in Mannheim. In letzterem Fall wird das CO<sub>2</sub> aus einer Ethanol-Fermentation gewonnen (Subitec 2016). Ein weiteres Beispiel ist eine Pilotanlage in unmittelbarer Nähe zum Braunkohlekraftwerk Niederaußem. In Kooperation mit der Jacobs University Bremen, dem Forschungszentrum Jülich und der Phytolutions GmbH betreibt die RWE AG einen Bioreaktor, der 6 t Algen (Trockenmasse) unter Einbindung von 12 t CO<sub>2</sub> pro Jahr produzieren kann. Das benötigte CO<sub>2</sub> stammt dabei aus der RWE eigenen Pilotanlage zur CO<sub>2</sub>-Abtrennung (RWE 2016). Obwohl noch F&E-Bedarf im Bereich der Bioreaktoren besteht, handelt es sich bei der biologischen Nutzung eher um einen natürlichen Prozess zur beschleunigten Erzeugung von Biomasse. Eine stoffliche Verwertung der Biomasse zu höherwertigen Produkten, wie Chemikalien und Kraftstoffen erfolgt mit entsprechenden Verfahren, wie sie bei der Biomassennutzung angewandt werden. Daher wird an dieser Stelle die biologische Nutzung von CO<sub>2</sub> zu

beschleunigtem Wachstum nicht zur eigentlichen Nutzung von CO<sub>2</sub> gezählt und im Folgenden nicht weiter betrachtet.

## 1.2 Kurzbeschreibung und Entwicklungsstand von Möglichkeiten der chemischen Nutzung von CO<sub>2</sub>

Aktuell existieren nur wenige kommerzielle Prozesse, bei denen CO<sub>2</sub> als Rohstoff eingesetzt wird. Zu den Produkten zählen Harnstoff, Methanol, Salicylsäure, organische Carbonate, Polycarbonate und Polyurethane. In Tab. 1-2 sind die Produktionsmengen der jeweiligen Stoffe sowie die spezifische und gesamte Menge an CO<sub>2</sub>, die zur Produktion der Produkte verwendet wird, zusammengefasst. Von den insgesamt eingesetzten 116 Mio. t CO<sub>2</sub> werden 94 % ausschließlich für die Harnstoff-Synthese genutzt.

**Tab. 1-2 Globales Produktionsvolumen industriell hergestellter organischer Produkte mittels CO<sub>2</sub> als Rohstoff sowie die jeweils gebundene Masse an Kohlendioxid pro kg Produkt und insgesamt pro Stoff**

Stoff	Unter Nutzung von CO <sub>2</sub> hergestellt	Jahr	Masse CO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub> gebunden im Produkt
Einheit	Mio. t/Jahr		kg/kg Produkt	Mio. t/Jahr
Urea (Harnstoff)	150	2010	0,73	109,5
Methanol (Beimischung von CO <sub>2</sub> ins Synthesegas)	4,4	2007	1,37	6
Methanol (direkt aus CO <sub>2</sub> und H <sub>2</sub> )	0,004	2014	1,37	0,00548
Salicylsäure	0,17	2011	0,318	0,054
organische Carbonate	0,1	2009	0,43-0,49	0,043-0,049
Bisphenol-A-Polycarbonat	0,6	2009	0,17	0,102
Polypropylencarbonat	0,070	2010	0,43	0,03
Polyurethane	0,005		0,20	0,001
Summe				≈ 116

Quelle: Aresta und Dibenedetto (2007); Asai Kasei Chemical (2013); BMBF (2016a); Boullard, Leblanc, Besson (2000); Covestro (2016); Kember, Buchard, Williams (2011); Mikkelsen, Jorgensen, Krebs (2010); Quadrelli, Centi, Dulpan (2011); Sunfire (2016)

### Harnstoff

Die Herstellung von Harnstoff ist das industriell größte Beispiel für die chemische Nutzung von CO<sub>2</sub>. Im Jahre 2010 wurden weltweit etwa 150 Mio. t Harnstoff mit CO<sub>2</sub> als Kohlenstoffquelle hergestellt (Meessen 2000: 658). Die Synthese erfolgt in einem zweistufigen Verfahren bei Drücken zwischen 150 bis 200 bar und Temperaturen von 150 bis 200 °C. Im ersten Schritt wird aus Ammoniak und CO<sub>2</sub> Ammoniumcarbamat gebildet, das im zweiten Schritt zu Harnstoff dehydriert wird (Mikkelsen et al. 2010).

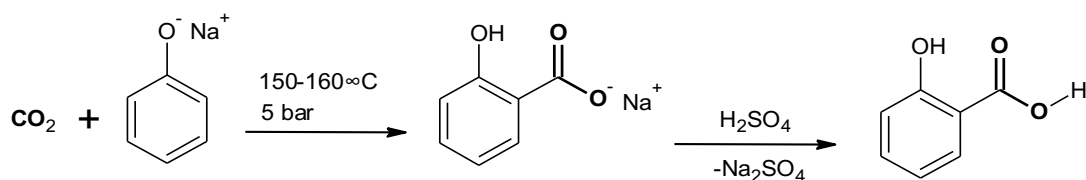
## Methanol

Im Jahr 2012 wurden weltweit 58 Mio. t Methanol über Synthesegas, bestehend aus Kohlenmonoxid und Wasserstoff, hergestellt (IEA 2013: 12). Beim konventionellen Prozess besteht die Möglichkeit CO<sub>2</sub> dem Synthesegas beizumischen. Durch eine umgekehrte Wassergas-Shift Reaktion wird das CO<sub>2</sub> durch Wasserstoff zu Kohlenmonoxid reduziert. Im Jahre 2007 wurden somit 6 Mio. t als Rohstoff bei der Methanol-Synthese eingesetzt (Aresta und Dibenedetto 2007).

Eine der ersten kommerziellen Anlagen zur direkten Methanolsynthese über die Hydrierung von CO<sub>2</sub> durch Wasserstoff betreibt die Firma Carbon Recycling International (CRI) in Island. Bei diesem Prozess wird der benötigte Wasserstoff durch Wasserelektrolyse hergestellt und das direkt angrenzende Geothermiekraftwerk HS Orka Svartsengi dient als CO<sub>2</sub>-Quelle. Die „George Olah Renewable Methanol Plant“ produziert jährlich 5 Mio. Liter Methanol (Carbon Recycling International 2014). Es existieren auch Pilotanlagen, wie beispielsweise betrieben von Mitsui Chemicals in Osaka (Japan), mit einer Kapazität von 100 t pro Jahr. Bei dem Prozess wird CO<sub>2</sub> aus einer petrochemischen Anlage und Wasserstoff, der als Nebenprodukt im Hochofen anfällt, zur Synthese genutzt. Mitsui Chemicals plant derzeit eine kommerzielle Anlage mit einer Kapazität von 0,6 Mio. t Methanol (Quadrelli et al. 2011).

## Salicylsäure

Industriell wird Salicylsäure über die Kolbe-Schmidt-Synthese durch die Reaktion von Natriumphenolat mit Kohlendioxid bei 150 bis 160 °C und 5 bar und anschließender Ansäuerung mit Schwefelsäure hergestellt (Boullard et al. 2000).

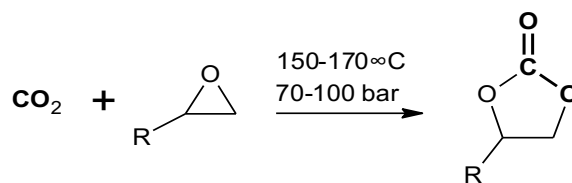


**Abb. 1-2 Kolbe-Schmidt-Synthese von Salicylsäure**

Die Produktionsmenge an Salicylsäure betrug im Jahr 2011 etwa 0,17 Mio. t (Quadrelli et al. 2011). Eines der bekanntesten Folgeprodukte von Salicylsäure ist das von der Bayer AG produzierte Aspirin®.

## Organische Carbonate

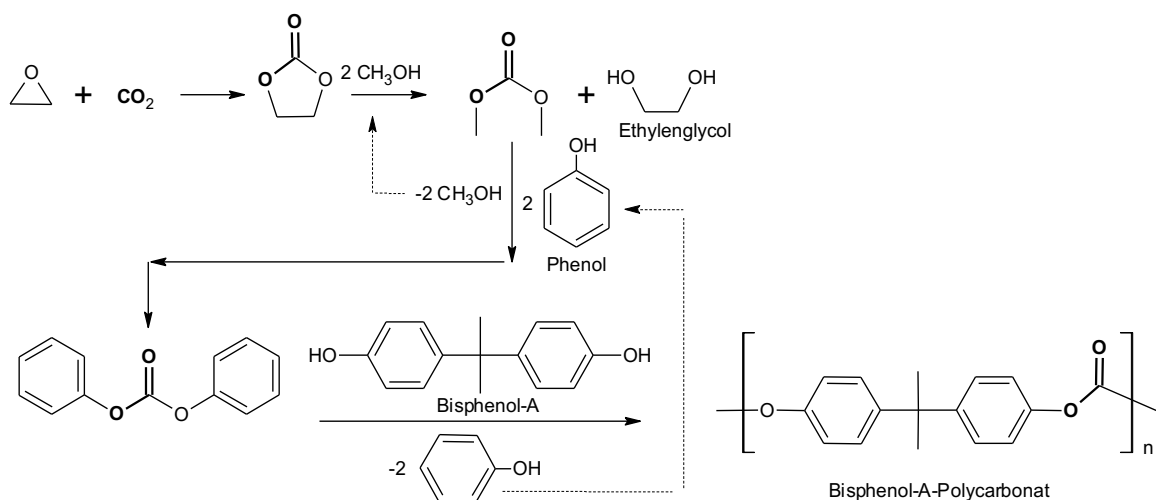
In den 50er Jahren wurden erstmals organische Carbonate, wie Ethylencarbonat und Propylencarbonat, über die Reaktion von CO<sub>2</sub> mit Epoxiden (siehe Abb. 1-3) hergestellt. Die Reaktion läuft bei Temperaturen zwischen 150 und 170 °C und Drücken von 70 bis 100 bar ab (Mikkelsen et al. 2010). Im Jahr 2009 wurden etwa 100.000 t organische Carbonate auf diese Weise hergestellt (Kember et al. 2011).



**Abb. 1-3**    **Synthese von Ethylencarbonat (mit R: H) und Propylencarbonat (mit R: CH<sub>3</sub>) über CO<sub>2</sub> und Ethylenoxid (mit R: H) bzw. Propylenoxid (mit R: CH<sub>3</sub>). Kolbe-Schmidt-Synthese von Salicylsäure**

## Bisphenol-A-Polycarbonat

Im Asahi Kasei Prozess wird Bisphenol-A-Polycarbonat aus Ethylenoxid, Phenol und CO<sub>2</sub> hergestellt (siehe Abb. 1-4). Das Gesamtverfahren ist ein Beispiel für eine kommerzielle Einbindung von CO<sub>2</sub> in einen Kunststoff. Vor der Einführung des Prozesses im Jahr 2002 wurden aromatische Polycarbonate über Kohlenmonoxid oder Phosgen hergestellt (Quadrelli et al. 2011). Bis zum Jahr 2009 baute Asahi Kasei weltweit sechs Anlagen mit einer Gesamtkapazität von ungefähr 0,6 Mio. t pro Jahr (Asahi Kasei Chemical 2013). Jedoch ist die Menge an Kohlendioxid, die dabei als Rohstoff eingesetzt wird, mit 0,17 kg CO<sub>2</sub> pro kg des Polymers relativ gering.



**Abb. 1-4**    **Vereinfachte Darstellung des Asahi Kasei Prozesses zur phosgenfreien Herstellung von Bisphenol-A-Polycarbonat aus Ethylenoxid, Bisphenol-A und CO<sub>2</sub>**

## Polypropylencarbonat

Im Jahr 2010 wurden 70.000 t Polypropylencarbonat (siehe Abb. 1-5) durch die Synthese von CO<sub>2</sub> mit Propylenoxid hergestellt (Federsel, Jackstell Beller 2010). Unter der Annahme, es handle sich um eine ausschließliche Co-Polymerisation von CO<sub>2</sub> und Propylenoxid, ohne die Polymerisation des Epoxids zu Poly-Ethern, werden für die Herstellung von einem Kilogramm Polymer 0,43 kg CO<sub>2</sub> eingesetzt.

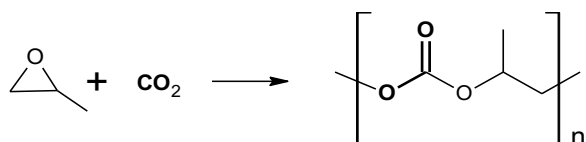


Abb. 1-5 Synthese von Polypropylencarbonat aus CO<sub>2</sub> und Propylenoxid

## Polyurethan

Die Covestro AG (vormals *Bayer MaterialScience AG*), ein Unternehmen der Bayer AG, eröffnete im Juni 2016 in Dormagen eine Produktionsanlage zur Herstellung von neuartigen Schaumstoff-Komponenten. Bei dem Prozess wird CO<sub>2</sub> als Rohstoff für die Herstellung von Polyolen eingesetzt (Abb. 1-6). Die Polyole werden anschließend mit Diisocyanaten zu Polyurethan-(PUR) Schaumstoffen umgesetzt. Dabei wird CO<sub>2</sub> chemisch fest in das Material eingebunden und hat einen Massenanteil von 20 % im Endprodukt. Derzeit wird der PUR-Schaum für die Herstellung von Matratzen und Polstermöbel eingesetzt. Die Investition für die Produktionsanlage belief sich auf rund 15 Mio. Euro und hat eine Produktionskapazität von 5.000 t pro Jahr. Die somit als Rohstoff benötigten 1.000 t CO<sub>2</sub> pro Jahr werden aus einem benachbarten Chemieunternehmen gewonnen, wo es als Abfallprodukt anfällt (Covestro 2016). Der Ursprung der Produktionsanlage stammt aus dem Projekt „Dream Production“, das vom BMBF gefördert wurde. Bei dem Projekt arbeitete die ehemalige Bayer MaterialScience AG zusammen mit der RWE Power AG und der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen an der Entwicklung der Pilotanlage (BMBF 2016a).

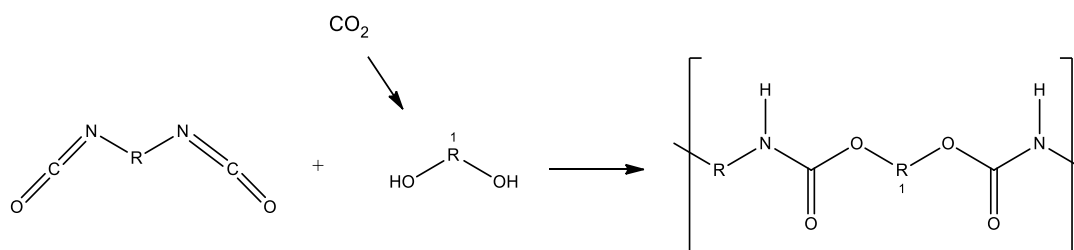


Abb. 1-6 Herstellung von Polyurethanen aus CO<sub>2</sub>-basierten Diolen und Diisocyanaten

## 1.3 Geförderte Forschungsprojekte zur chemischen Nutzung von CO<sub>2</sub>

Die Forschung im Bereich der chemischen Nutzung von CO<sub>2</sub> hat in den vergangenen Jahren einen starken Zuspruch durch Politik und Gesellschaft erhalten. In der nachfolgenden Tabelle sind einige wichtige Förderprojekte der BMBF-Forschungsinitiative „Technologien für Nachhaltigkeit und Klimaschutz – Chemische Prozesse und stoffliche Nutzung von CO<sub>2</sub>“ zusammengefasst. Hinzuweisen ist auch auf die kürzlich gestartete Forschungsinitiative Kopernikus<sup>1</sup>, in der u. a. die Herstellung von Basischemikalien untersucht wird.

Die vom BMBF geförderten Projekte haben den Fokus auf der Nutzung von CO<sub>2</sub> zur Synthese von Polymeren (Dream Reactions, Dream Production, CO<sub>2</sub> als Polymerbau-

<sup>1</sup> <https://www.kopernikus-projekte.de/projekte/power-to-x>

stein), Kraftstoffen und Brennstoffen (Sunfire, SEE), Basischemikalien (Valery, Acer, DMEEXCO<sub>2</sub>, OrgKoKAT) sowie der photochemischen Umwandlung von CO<sub>2</sub> (SolarSTEP, PhotoKat).

**Tab. 1-3      Ausgewählte nationale Förderprojekte zur chemischen Nutzung von CO<sub>2</sub>**

Projektname	Beteiligte Unternehmen/Einrichtung	Beschreibung
Dream Reactions	Bayer Technology Services GmbH; Forschungszentrum Karlsruhe; Technische Universität Dortmund; Technische Universität Darmstadt; Max Planck Institut; TU Berlin; RWTH Aachen; Leibniz-Institut für Katalyse	Katalysatorentwicklung zur chemischen Synthese von Polycarbonaten
Dream Production	COVESTRO; Bayer Technology Services; RWE Power AG; RWTH Aachen	Pilotanlage zur Produktion von Polyetherpolycarbonatpolyolen im Kilogramm-Maßstab
CO <sub>2</sub> als Polymerbaustein	BASF SE; Siemens AG; TU München	Chemische Nutzung von CO <sub>2</sub> zur Synthese von hochwertigen Polymeren; Charakterisierung von Produkteigenschaften; Entwicklung von Katalysatoren zur Synthese von Polycarbonaten aus CO <sub>2</sub> und Epoxiden.
OrgKoKAT	Bayer Technology Services GmbH; Creavis Technologies & Innovation	Entwicklung neuer Organokatalysatoren und kooperativer Katalysatorverfahren, die einen attraktiven Zugang zu cyclischen Carbonaten, Polycarbonaten und $\beta$ -Ketosäurederivaten mittels CO <sub>2</sub> ermöglichen
PhotoKat	Ruhr-Universität Bochum	Entwicklung aktiver und selektiver heterogener Photokatalysatoren für die Reduktion von CO <sub>2</sub> zu C1-Basischemikalien (z. B. Methanol und Methan)
Valery	Evonik Degussa GmbH; Creavis Technologies & Innovation; Evonik Oxeno GmbH; Max Planck Institut für Katalyse e.V.; Universität Bayreuth	Energieeffiziente Synthese von aliphatischen Aldehyden aus Alkanen und CO <sub>2</sub> am Beispiel der Valeraldehyd-Synthese aus Butan und CO <sub>2</sub>
SEE	h-tec Wasserstoff-Energie-Systeme GmbH; Fraunhofer ISE; OLITEC Ionic Liquids Technologies GmbH; EnBW AG; Karlsruher Institut für Technologie	Hydrierung von CO <sub>2</sub> zu synthetischem Erdgas (Methan)
Acer	BASF SE; TU München; Universität Stuttgart	Katalytische Synthese von Natriumacrylat aus CO <sub>2</sub> und Ethylen
SolarSTEP	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.; Karlsruher Institut für Technologie; BASF SE	Erforschung und Qualifizierung von geeigneten Katalysatormaterialien in Form von Metalloxiden (MxOy) zur solarthermochemischen Erzeugung von Synthesegas aus CO <sub>2</sub> und H <sub>2</sub> O
DMEEXCO <sub>2</sub>	BASF SE; Linde AG; hte AG; TU München; Max Planck Institut; Fraunhofer UMSICHT	Einstufiges, heterogen katalysiertes Verfahren zur Synthese von Dimethylether (DME) aus CO <sub>2</sub> und Methan
Sunfire	Sunfire GmbH; Fraunhofer ICT; Eifer; Staxera GmbH; Forschungszentrum Jülich GmbH; Universität Stuttgart; CVT Chemical Engineering	Aufbau einer Pilotanlage zur Synthese von Kraftstoffen (Benzin, Diesel, Kerosin, Methanol, Methan) aus H <sub>2</sub> und CO <sub>2</sub>

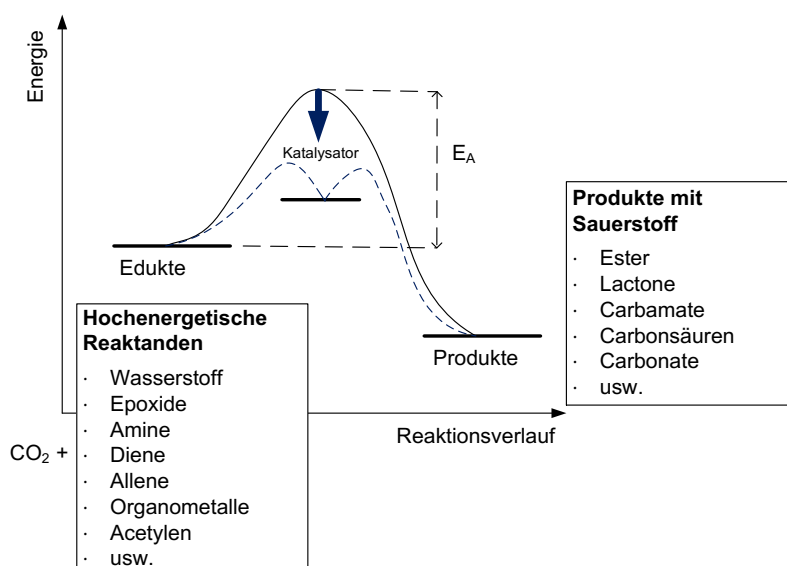
Quelle: BMBF (2016b)



## 2 Entwicklungsbedarf für die chemische industrielle CO<sub>2</sub>-Nutzung

### 2.1 Grundlagen der chemischen CO<sub>2</sub>-Nutzung

CO<sub>2</sub> ist ein Molekül mit 16 Elektronen und besitzt trotz zweier polarer C=O-Bindungen aufgrund seiner linearen Struktur im Grundzustand kein Dipolmoment. CO<sub>2</sub> hat den niedrigsten Energiezustand von allen kohlenstoffhaltigen binären neutralen Spezies. Trotzdem sind exotherme Reaktionen von CO<sub>2</sub>, wie in Abb. 2-1 gezeigt, zu Produkten, die eine niedrigere Energie besitzen, möglich. Dabei handelt es sich um Reaktionen, bei denen ein weiteres Atom, wie z. B. Sauerstoff oder Stickstoff, von energiereichen Reaktanden an das Kohlenstoffatom des CO<sub>2</sub>-Moleküls gebunden wird. Dabei entstehen organische Produkte, wie Carboxylate und Lactone (RCOOR), Carbonate (ROC(O)COR), Isocyanate (RNCO) und Harnstoffderivate (RRNCONRR).



**Abb. 2-1 Energiediagramm für organische Synthesen von CO<sub>2</sub> mit hochenergetischen Reaktanden zu Produkten mit niedrigem Energieniveau**

Quelle: Sakakura, Choi und Yasuda (2007: 2365)

Reaktionen, bei denen das Kohlenstoffatom reduziert wird, benötigen die Zufuhr von Energie in Form von Wärme bei thermischen Prozessen oder in Form von Strom bei elektrochemischen Prozessen. Beispiel hierfür ist die Bildung von Formaten, Oxalaten, Formaldehyd, Kohlenmonoxid, Methanol oder Methan (Aresta und Dibenedetto 2007: 2977). Dies bedeutet aber nicht, dass bei jedem dieser Prozesse externe Energie zugeführt werden muss. So liefert beispielsweise bei der Reaktion von CO<sub>2</sub> mit Wasserstoff die Bildung von Wasser als Nebenprodukt nicht nur die benötigte Energie für die Umsetzung, sondern sorgt sogar für die Freisetzung von thermischer Energie.



Viele dieser Reaktionen sind jedoch aufgrund der hohen Aktivierungsenergie kinetisch gehemmt und laufen nur sehr langsam ab. Daher müssen CO<sub>2</sub> und/oder der Co-Reaktand zuvor aktiviert werden. Durch die Wahl geeigneter Reagenzien oder Katalysatoren kann die Reaktion über einen alternativen Reaktionspfad mit geringerer Aktivierungsenergie geführt werden.

**Tab. 2-1 Mögliche Stoffgruppen der Reaktionen mit CO<sub>2</sub> in Abhängigkeit der Art des Reaktionspartners**

Reaktionspartner	Stoffgruppen	Anmerkung
H-aktive organische Verbindungen	Carbonsäuren und Coumarine	Stöchiometrischer Einsatz von basischen und sauren Hilfsstoffen
Organometallische Reagenzien	Carbonsäuren	Stöchiometrischer Einsatz von Metallen
Alkene	Ungesättigte Carbonsäuren	
Konjugierte Diene	Lactone und ungesättigte Ester	Produktabsplaltung aus dem Metallzyklus zerstört meist den Katalysator
Allene	Pyrone und ungesättigte Ester	
Methylen cyclopropan	Lactone und Pyrone	
Alkine	Lactone und Pyrone	
Wasserstoff	Carbonsäuren, Ether, Alkohole und Alkanale	Katalytische Reaktion
Epoxide	Cyclische Carbonate und Polycarbonate	
Diole	Cyclische Carbonate	
Alkohole	Lineare Carbonate	
Ammoniak	Urea (Harnstoff)	
Amine	Lineare Urea-Derivate, Isocyanate und cyclische Carbamate	Teilweiser Einsatz von phosphorhaltigen Kondensationsreagenzien
Diamine	Cyclische Urea-Derivate, Polyharnstoff	
Amine oder NH <sub>3</sub> + Alkohole	Lineare Carbamate	Katalytische Reaktion
Aziridine	Polyurethane	
Aminoalkohole	Cyclische Carbamate	
Epichlorhydrin, Cyclohexenoxid, Propylenoxid, Limonenoxid, Oxetane	Polycarbonate	

Quelle: Otto (2015), Sefidroudi (2015)

Tab. 2-1 enthält eine Übersicht der wichtigsten Stoffgruppen, die in Abhängigkeit der Art des Reaktionspartners über CO<sub>2</sub> darstellbar sind. Außerdem beinhaltet die Tabelle eine kurze Anmerkung zu den jeweiligen Reaktionen bezüglich des eventuellen

Einsatzes von stöchiometrischen Hilfsstoffen, beziehungsweise der Wiederverwendbarkeit des Katalysators.

In der Literatur findet sich eine Vielzahl von Reaktionen, bei denen CO<sub>2</sub> als Edukt mit unterschiedlichen Reaktionspartnern zu den entsprechenden Produktgruppen umgesetzt wird. Zum Großteil wurden diese Reaktionen bisher nur im Labormaßstab synthetisiert. Die durchgeführten Synthesen weisen einen starken Grundlagenforschungscharakter auf.

## 2.2 Entwicklungsbedarf

Der Schlüssel einer erfolgreichen Umsetzung von CO<sub>2</sub> liegt in der Katalyse. Um die Aktivierungsenergie bei der CO<sub>2</sub>-Umsetzung deutlich zu reduzieren und gleichzeitig die Reaktionsgeschwindigkeit zu erhöhen, kann das CO<sub>2</sub>-Molekül durch Koordination an Metalle aktiviert werden. Es ist auch vorteilhaft, dass CO<sub>2</sub> leicht in Bindungen zwischen Edelmetallen und anderen Molekülen invertiert.

Obwohl in der Katalyse schon viele Fortschritte erzielt wurden, besteht noch erheblicher F&E Bedarf. Dazu gilt es vor allem die Umsätze der Reaktionen zu erhöhen und Katalysatoren zu entwickeln, die auch in der Lage sind, bei niedrigen CO<sub>2</sub>-Partialdrücken und in Gegenwart von NO<sub>x</sub> und SO<sub>x</sub> hohe Selektivitäten zu erreichen und stabiler gegen eventuelle Verunreinigungen (z. B. H<sub>2</sub>S) des eingesetzten Kohlendioxids sind.

Eine Aktivierung von CO<sub>2</sub> unter reduktiven Bedingungen ist nur unter der Einbindung von regenerativen Energien oder photokatalytischen Wegen sinnvoll (Kruse et al. 2015). Hinsichtlich der photokatalytischen und elektrochemischen Umwandlung von CO<sub>2</sub> besteht noch ein erheblicher Bedarf an Grundlagenforschung.

Die Abtrennung von Wasser während der Reaktion kann helfen, zahlreiche Reaktionen von CO<sub>2</sub> mit Alkoholen zu realisieren. Dabei könnte besonders die Weiterentwicklung von Membranreaktoren einen wichtigen Beitrag leisten (Kruse et al. 2015). Ebenso könnten diese auch dabei helfen, bei Reaktionen, deren thermodynamisches Gleichgewicht auf der Edukt-Seite liegt, durch gezieltes Entfernen von Produkten, die Reaktionsumsätze zu erhöhen.

Für den Großteil der in der Literatur beschriebenen CO<sub>2</sub>-Nutzungsreaktionen wurden bereits Katalysezyklen im Labormaßstab bestätigt. Für diese Reaktionen fehlen in der Regel die verfahrenstechnischen Auslegungen der Prozesse sowie deren Demonstration über den Labormaßstab hinaus.

Für Polymere (Kunststoffe), die direkt aus CO<sub>2</sub> synthetisiert werden (z. B. Polypropylencarbonat oder Polycyclohexylcarbonat) müssen noch mögliche Anwendungen intensiver erforscht werden, um genaue Mengenpotenziale für die CO<sub>2</sub>-Nutzung abzuleiten sowie das Potenzial zur CO<sub>2</sub>-Reduktion zu ermitteln. Bei anderen Polymeren, wie beispielsweise der Polyacrylsäureherstellung, sind noch substantielle Forschungsarbeiten notwendig und den Katalysezyklus des Monomers über CO<sub>2</sub> und Ethylen zu realisieren (Kruse et al. 2015).

Technische Herausforderungen bei der Synthese von Kraftstoffen<sup>2</sup> aus CO<sub>2</sub> liegen in der Katalyse und der Reaktionstechnik. Außerdem ist für die Synthese von Kraftstoffen aus CO<sub>2</sub> und Wasserstoff entscheidend, dass der eingesetzte Wasserstoff über regenerative Energie bereitgestellt wird. Dabei ist aus energetischer Sicht eine Verknüpfung mit einer zukünftigen Wasserstoffwirtschaft von großer Bedeutung. Für eine zukünftige wirtschaftliche Umsetzung ist eine Kostenreduktion für die Wasserstoffbereitstellung aus erneuerbaren Energien essentiell. Es besteht zudem noch Forschungsbedarf bei der Ermittlung, welche Art von Kraftstoffen zukünftig am sinnvollsten hergestellt werden sollte und wie diese in die bestehende Infrastruktur eingegliedert werden können.

Generell, unabhängig davon ob CO<sub>2</sub> als Rohstoff für Kraftstoffe, Chemikalien oder Polymere eingesetzt wird, ist es für eine positive CO<sub>2</sub>-Bilanz ausschlaggebend, dass die eventuell benötigte Wärme oder der benötigter Strom bzw. die Reaktionspartner einen möglichst geringen CO<sub>2</sub>-Rucksack aufweisen. Auch ist ein direkter Vergleich der Energie- und CO<sub>2</sub>-Bilanz mit konventionellen Methoden nötig, um Aussagen über Energiebedarfe und CO<sub>2</sub>-Reduktionspotenziale zu erstellen. Dies gilt vor allem, wenn konventionelle Produkte direkt durch CO<sub>2</sub>-basierte Produkte substituiert werden können. Erst durch detaillierte Lebenszyklusanalysen, mit denen die einzelnen Produkte und mögliche Substitute in den Blick genommen werden, lassen sich belastbare Aussagen darüber treffen, ob die CO<sub>2</sub> Bilanz insgesamt verbessert wird.

Der hier beschriebene F&E-Bedarf ergänzt den bereits in der Vorstudie „Energietechnologien 2050“ (Wietschel et al. 2010) beschriebenen Bedarf hauptsächlich um die Notwendigkeit, für die Aktivierung des Kohlendioxids verstärkt erneuerbare Energien einzusetzen. Des Weiteren ist der F&E-Bedarf um Analysen zu ergänzen, die vorab die CO<sub>2</sub>-basierte Synthese bezüglich ihrer Klimarelevanz und somit des CO<sub>2</sub>-Reduktionspotenziales gegenüber den konventionellen Prozessen/Verfahren beurteilen. CO<sub>2</sub>-basierte Verfahren für Stoffe zu entwickeln, die eine weltweite Produktion von wenigen Tonnen aufweisen, haben generell vernachlässigbare Auswirkungen auf das Klima und sollten bei der öffentlichen Förderung kritisch betrachtet werden. Zudem sollten CO<sub>2</sub>-basierte Produkte bereits am Anfang ihrer Entwicklung einer Umfeldanalyse unterzogen werden, um zukünftige Marktpotenziale und somit CO<sub>2</sub>-Reduktionspotenziale früh identifizieren und abschätzen zu können.

---

<sup>2</sup>Siehe hierzu auch *Technologiefeld 4.3: Power-to-liquids/chemicals*

### 3 Relevanz öffentlicher Förderung

#### 3.1 Kriterium 1: Vorlaufzeiten

Wie zuvor beschrieben, existieren bereits kleinere Pilot- und Demonstrationsanlagen zur chemischen Nutzung von CO<sub>2</sub>, mit denen organische Chemikalien, Polymere oder auch Kraftstoffe hergestellt werden. In der einschlägigen Literatur (Aresta, 2010; Otto et al. 2015) werden weitere zahlreiche Reaktionen zu Produkten beschrieben. Bei einem Großteil der Reaktionen handelt es sich um reine Grundlagenforschung, die – wenn überhaupt – im Labormaßstab realisiert wurden. Eine Ausnahme ist die Polyurethan-Produktion der Fa. Covestro, bei der Grundlagenforschungserkenntnis in relativ kurzer Zeit in eine kommerzielle Produktion umgesetzt wurden. Für fast alle der zuvor vorgeschlagenen Reaktionen ist jedoch nicht absehbar, ob sie für eine kommerzielle Nutzung weiterentwickelt werden. Die nachfolgende Bewertung umfasst sowohl Bulkchemikalien als auch Polymere. Die Vorlaufzeit (bis 2040) ist als obere Grenze aufzufassen. Generell wäre eine Aufteilung nach Produkten wünschenswert, kann aber aufgrund des Zeitaufwandes im Rahmen der vorliegenden Studie nicht geleistet werden. So kann nicht ausgeschlossen werden, dass die Vorlaufzeiten einiger Produkte durchaus geringer sein können. Aufgrund der großen Unsicherheiten sowie angesichts der Tatsache, dass derzeit keine belastbaren Potenzialaussagen für Deutschland vorliegen, wird auf die Differenzierung nach Szenariowelten verzichtet.

**Tab. 3-1 Vorlaufzeiten bis zur Kommerzialisierung der chemischen Nutzung von CO<sub>2</sub> (Bulkchemikalien, Polymere)**

Abhängig von den verschiedenen Szenarienentwicklungen und öffentlicher Förderung ist mit der Inbetriebnahme der ersten kommerziellen Anlage in Deutschland zu rechnen ...

Szenarienbereich DE_80 %	bis 2020 <input type="checkbox"/>	bis 2030 <input type="checkbox"/>	bis 2040 <input checked="" type="checkbox"/>	bis 2050 <input type="checkbox"/>	nach 2050 <input type="checkbox"/>
Szenarienbereich DE_95 %	bis 2020 <input type="checkbox"/>	bis 2030 <input type="checkbox"/>	bis 2040 <input checked="" type="checkbox"/>	bis 2050 <input type="checkbox"/>	nach 2050 <input type="checkbox"/>

#### 3.2 Kriterium 2: Forschungs- und Entwicklungsrisiken (technisch, wirtschaftlich, rohstoffseitig)

Die Angabe von Entwicklungsstadien für eine Sammlung von Produkten (Bulkchemikalien, Polymere) erscheint wenig sinnvoll. Daher wird im Folgenden die Bewertung von Entwicklungsstadien nur für einige ausgewählte Produkte oder Verfahren vorgenommen, die als visionär oder zukunftsweisend zu bezeichnen sind. Dies sind die photo- sowie elektrokatalytische Reduktion von CO<sub>2</sub>, die Herstellung von Polymeren sowie die Hydrierung von CO<sub>2</sub>. Da für einige Stoffe schon der Labornachweis erfolgt ist, wird der TR-Level der photokatalytischen Aktivierung mit TRL 3 und der TR-Level der elektrochemischen Aktivierung mit TRL 4 bewertet. Auch bei dem Einbau von C1 für Polymere ist der TRL-Bewertungsgrad vom jeweiligen Produkt bzw. Verfahren abhängig. Legt man beispielsweise die PUR Herstellung zugrunde, wie sie von der Fa. Covestro beforscht wird, ist ein TR-Bewertungsgrad von TRL 7 bis 8 anzusetzen. Bei anderen Polymeren wird der Einbau von CO<sub>2</sub>-Molekülen in einer Bandbreite von TRL 3 bis TRL 4 geschätzt. Zwar wurden bislang die meisten Hydrierungen im Labormaßstab durchgeführt; allerdings gibt es einige Produkte, die bereits

heute schon kommerziell (z. B. Methanol, Harnstoff oder Methan) hergestellt werden. Diese Produkte auf Basis von CO<sub>2</sub>-Hydrierung werden in einem Bereich von TRL 7 bis TRL 9 bewertet. Hingegen ist die Herstellung von Dimethylester (DME) in einer Bandbreite von TRL 4 bis 5 zu bewerten.

**Tab. 3-2     Aktuelles Entwicklungsstadium des Technologiefeldes chemische Nutzung von CO<sub>2</sub>**

Grobklassifizierung	Feinklassifizierung	T1	T2	T3
Grundlagenforschung				
	TRL 1 – Grundlegende Prinzipien beobachtet und beschrieben, potentielle Anwendungen denkbar	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Technologieentwicklung		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	TRL 2 – Beschreibung eines Technologiekonzepts und/oder einer Anwendung	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	TRL 3 – Grundsätzlicher Funktionsnachweis einzelner Elemente einer Anwendung/Technologie	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	TRL 4 – Grundsätzlicher Funktionsnachweis Technologie/Anwendung im Labor	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Demonstration		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	TRL 5 – Funktionsnachweis in anwendungsrelevanter Umgebung	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	TRL 6 – Verifikation mittels Demonstrator in anwendungsrelevanter Umgebung	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	TRL 7 – Prototypentest in Betriebsumgebung	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	TRL 8 – Qualifiziertes System mit Nachweis der Funktionstüchtigkeit in Betriebsumgebung	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Kommerzialisierung				
	TRL 9 – Erfolgreicher kommerzieller Systemeinsatz	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

TRL= Technology Readiness Level

T1 = Photo- u. elektrokatalytische Aktivierung von CO<sub>2</sub>, T2 = Polymere, T3 = Hydrierung von CO<sub>2</sub>

**Tab. 3-3 Bewertung technischer und wirtschaftlicher Forschungs- und Entwicklungsrisiken in Zusammenhang mit Technologiefeld chemische Nutzung von CO<sub>2</sub>**

	sehr gering	gering	eher gering	eher hoch	hoch	sehr hoch
Photo- u. elektrokatalytische Aktivierung von CO <sub>2</sub>						
Das <i>technische</i> Forschungs- und Entwicklungsrisiko ist ...	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Das <i>wirtschaftliche</i> Forschungs- und Entwicklungsrisiko ist ...	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Polymere						
Das <i>technische</i> Forschungs- und Entwicklungsrisiko ist ...	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Das <i>wirtschaftliche</i> Forschungs- und Entwicklungsrisiko ist ...	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Hydrierung von CO <sub>2</sub>						
Das <i>technische</i> Forschungs- und Entwicklungsrisiko ist ...	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Das <i>wirtschaftliche</i> Forschungs- und Entwicklungsrisiko ist ...	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Bei der photo- und elektrokatalytischen Aktivierung von CO<sub>2</sub> handelt es sich um Grundlagenforschung, deren Gelingen und Umsetzung noch völlig offen ist. Vor diesem Hintergrund wird sowohl das technische als auch das wirtschaftliche F&E Risiko als eher hoch eingeschätzt. Mit Wasserstoff ermöglicht die Hydrierung von CO<sub>2</sub> verschiedene Ansätze zur CO<sub>2</sub>-Fixierung. Bei Verwendung von Methanol als Rohstoff für Formaldehyd könnte der Markt CO<sub>2</sub>-haltiger Polymere deutlich vergrößert werden. Die Hydrierung von CO<sub>2</sub> zu wichtigen chemischen Produkten wie Methanol oder Ameisensäure und ihren Derivaten ist intensiv untersucht worden. Katalysatorsysteme für die in der Regel exothermen Reaktionen sind prinzipiell bekannt. Erheblicher Forschungsbedarf wird noch an der Schnittstelle zwischen Chemie und Ingenieurwissenschaft gesehen. (vgl. Müller und Leitner 2012)

## 4 Detaillierte Bewertung des Technologiefeldes

### 4.1 Kriterium 3: Marktpotenziale

Ausgangspunkt für die Ableitung von Marktpotenzialen sind die ausgewählten Szenarien, die im Kriterienkatalog genannt sind. Die Auswertung zeigte, dass in keinem Szenario die Möglichkeit thematisiert wird, CO<sub>2</sub> für industrielle Anwendungen zu nutzen. Daher werden im Folgenden andere Studien herangezogen, in denen zumindest CO<sub>2</sub>-Einsatzpotenziale abgeschätzt wurden. Wie in (Otto 2015) gezeigt, gibt es eine Vielzahl von Möglichkeiten CO<sub>2</sub> für verschiedenste Produkte zu nutzen. Bereits heute werden weltweit etwa 130 Mio. t pro Jahr als Rohstoff verwendet. Als wichtigste Produkte sind Harnstoff, Methanol, Salicylsäure, anorganische und organische Carbonate sowie Polycarbonate zu nennen. Der überwiegende Anteil entfällt auf die Harnstoffproduktion. In einem Diskussionspapier der DECHEMA (Ausfelder und Bazzanella 2008) wird das weltweite Substitutionspotenzial für Polymere und Basischemikalien auf 178 Mio. t CO<sub>2</sub> geschätzt, wobei von heutigen Produktionsmengen ausgegangen wird. Ausgehend von der deutschen Polymerproduktion des Jahres 2011 (ca. 20,7 Mio. t) schätzen (Schüwer et al. 2015) unter Berücksichtigung von Import und Exporten sowie Recycling eine Produktionsmenge von ca. 7 Mio. t Polymere ab, die als Marktpotenzial interpretiert werden können. Das mögliche CO<sub>2</sub>-Einsatzpotenzial wird von den Autoren auf ca. 15 Mio. t geschätzt (siehe Kapitel 4.2). Über Abschätzungen zu zukünftigen Marktentwicklungen von Polymeren sowie Basischemikalien liegen keine Informationen vor.

### 4.2 Kriterium 4: Beitrag zu Klimazielen und weiteren Emissionsminderungszielen

Die Angabe eines CO<sub>2</sub>-Reduktionspotenzials oder anderer Emissionsreduktionen erfordert einen detaillierten Vergleich der Herstellungsverfahren von „neuen“ Produkten (mit eingebundenem CO<sub>2</sub>) und Produkten, die auf der Basis heute üblicher Verfahren hergestellt werden. Belastbare Aussagen lassen sich nur auf der Basis produktbezogener detaillierte Lebenszyklusanalysen treffen. Da diese jedoch nicht vorliegen, gestaltet es sich sehr schwierig, Klimagasreduktionspotenziale anzugeben. In einer Arbeit des Forschungszentrums Jülich (Otto 2015) wurde eine grobe Abschätzung vorgenommen, um das mögliche Reduktionspotenzial für Bulkchemikalien und Feinchemikalien abzuschätzen. Die Potenziale wurden für die Europäische Union (EU 28) ermittelt. Eine analoge Abschätzung wurde in der zitierten Arbeit auch für die Herstellung von Kraftstoffen durchgeführt, die im Nachfolgenden im Rahmen eines Exkurses kurz skizziert wird und als Vergleich mit den Anwendungen Bulkchemikalien und Polymere dienen soll.

#### Organische Bulkchemikalien und Feinchemikalien

In besagter Studie (Otto 2015) wurden auf Grundlage einer ausführlichen Literaturrecherche 123 CO<sub>2</sub>-Nutzungsreaktionen identifiziert und bewertet. Der Fokus lag dabei auf der chemischen Umsetzung von CO<sub>2</sub> zu organischen Produkten, durch die konventionell hergestellte Verbindungen substituiert werden können. Die aus den Reaktionen resultierenden Produkte konnten in 23 Bulkchemikalien und 100 Feinchemikalien unterteilt werden. Bei der Bewertung wurden die Reaktionen bezie-



hungsweise Produkte bezüglich des CO<sub>2</sub>-Reduktionspotenzials und des wirtschaftlichen Interesses, das die chemische Industrie an den resultierenden Produkten haben könnte, eingeordnet. Die Bewertung erfolgte dabei anhand von Auswahlkriterien, die speziell auf die Bulk- und Feinchemikalien angepasst wurden, um eine sensible Einordnung der Stoffe in eine Rangliste zu erreichen sowie die zugrundeliegende Qualität der Daten zu berücksichtigen. Unter den Bulkchemikalien werden die CO<sub>2</sub>-basierten Reaktionen zu Ameisensäure, Formaldehyd, Oxalsäure, Methanol, Harnstoff und Dimethylether sowie bei den Feinchemikalien zu Methylcarbammat, 3-Oxopentandicarbonsäure, 2-Imidazolidion und Ethylcarbammat als besonders vielversprechend angesehen. Ausgehend von 23 betrachteten Bulkchemikalien mit einer jährlichen EU-weiten Produktionsmenge von etwa 78 Mio. Tonnen und unter Berücksichtigung der spezifisch eingesetzten Masse an CO<sub>2</sub> errechnet sich eine CO<sub>2</sub>-Menge von etwa 59 Mio. Tonnen pro Jahr als möglicher Rohstoff. Hierbei wurden die EU-weiten Produktmengen aus dem Jahr 2011 zugrunde gelegt. Die Harnstoffsynthese weist mit ca. 40 Mio. t das höchste CO<sub>2</sub>-Nutzungspotenzial auf. Jedoch erfolgt bereits die konventionelle Harnstoffsynthese ausschließlich über CO<sub>2</sub>, sodass es sich hierbei um kein neues Potenzial für die CO<sub>2</sub>-Nutzung handelt. Unter Vernachlässigung von Harnstoff errechnet sich daher ein Substitutionsrohstoffpotenzial von ungefähr 20 Mio. t CO<sub>2</sub>.

Im Gegensatz dazu beträgt die Produktionsmenge für die 12 Stoffgruppen innerhalb der EU, in die die von Otto (2015) 100 betrachteten Feinchemikalien eingeordnet werden konnten, etwa 4,3 Mio. Tonnen pro Jahr. Dabei muss berücksichtigt werden, dass es sich bei den produzierten Mengen der Stoffgruppen nicht nur um die 100 betrachteten Feinchemikalien, sondern um alle innerhalb aller EU-Staaten produzierten Stoffe handelt, die diesen Stoffgruppen angehören. Das Potenzial ist daher als obere Grenze zu verstehen. Legt man lediglich die 100 analysierten Feinchemikalien zugrunde, reduziert sich das EU-weite Einsatzpotenzial auf ca. 1,3 Mio. t CO<sub>2</sub>. Verglichen mit den Bulkchemikalien können mit den Feinchemikalien somit nur relativ geringe CO<sub>2</sub>-Mengen gebunden werden. Sie sind als mögliche Klimagasvermeidungsoption nicht geeignet und werden im Nachfolgenden auch nicht weiter behandelt.

## Polymere

Prinzipiell existieren zwei Wege, um CO<sub>2</sub> zur Synthese von Polymeren einzusetzen. Ein Weg ist die Nutzung von CO<sub>2</sub> als Rohstoff zur Synthese der Edukte für konventionelle Kunststoffe. Der zweite Weg besteht darin, CO<sub>2</sub> direkt als Monomer für eine Co-Polymerisation mit einem geeigneten Reaktionspartner zu nutzen, wie beispielsweise zur Synthese von Polycarbonaten.

Analog zu den organischen Bulk- und Feinchemikalien wurde in Sefidroudi (2015) die Synthese von Polymeren über diese beiden Wege bewertet. Für den ersten Weg wurden die meist produzierten, konventionellen Kunststoffe in Europa, zu denen Polyethylen, Polypropylen, Polyvinylchlorid, Polyethylenterephthalat, Polystyrol und Polyurethan gehören, analysiert. Für den zweiten wurden 23 Reaktionen aus der Literatur identifiziert.

Aus der Bewertung resultiert, dass besonders der Einsatz von CO<sub>2</sub> als Rohstoff zur Synthese der Ausgangsstoffe (Weg 1) Ethen und Vinylchlorid zur Synthese von Po-

lyethylen und Polyvinylchlorid geeignet ist. Insgesamt können durch die europaweite Substitution der konventionellen Kunststoffe Polyethylen, Polypropylen, Polyvinylchlorid, Polyethylenterephthalat, Polystyrol und Polyurethan über CO<sub>2</sub>-basierte Verfahren ca. 40 Mio. t CO<sub>2</sub> als Rohstoff eingesetzt werden. Auf den deutschen Markt bezogen könnten theoretisch etwa 15 Mio. t CO<sub>2</sub> pro Jahr für die Synthese von Kunststoffen eingesetzt werden (Schüwer et al. 2015). Beim zweiten Weg, der direkten Nutzung von CO<sub>2</sub> als Rohstoff für Polymere, weisen Polycarbonate das höchste Potenzial auf. Obwohl für die direkt synthetisierten Polymere in den meisten Fällen noch konkrete Anwendungen gefunden werden müssen, haben diese den Vorteil, dass der CO<sub>2</sub>-Anteil im Endprodukt höher ist und somit stärker auf fossile Rohstoffe verzichtet werden kann (Sefidroudi 2015).

**Tab. 4-1 CO<sub>2</sub>-Einsatzpotenziale für Polymere und Bulkchemikalien**

<b>Polymere</b>	
EU	ca. 40 Mio. t
Deutschland	ca. 15 Mio. t
<b>Bulkchemikalien</b>	
<i>Harnstoffsynthese</i>	
EU	ca. 40 Mio. t
Deutschland	n.V.
<i>.....Sonstige Bulkchemikalien</i>	
EU	ca. 20 Mio. t
Deutschland	n. V.
Anmerkung: n. V. = Wert nicht verfügbar	

Quelle: Otto (2015), Otto et al. (2015), Schüwer et al. (2015), Sefidroudi (2015)

### Exkurs CO<sub>2</sub> für die Kraftstoffherstellung

CO<sub>2</sub> kann mit Wasserstoff als Reaktionspartner zur Herstellung von synthetischen Kohlenwasserstoffen, Alkoholen und Oxygenaten genutzt werden, welche als Kraftstoffsubstitute im Transportsektor eingesetzt werden können. Beispielsweise können durch die direkte Hydrierung von Kohlendioxid Dimethylether (DME) und Methanol (MeOH) hergestellt werden, die als Diesel- bzw. Benzin-Ersatz dienen. Des Weiteren besteht die Möglichkeit das synthetische Methanol zu Folgeprodukten wie Dimethylcarbonat (DMC) oder Oxymethylethern (OME) mit unterschiedlichen Kettenlängen umzuwandeln, die ebenfalls in modifizierten Benzin- bzw. Dieselmotoren verbrannt werden können (Ausfelder und Bazzanella 2008).

Ein indirekter Weg führt über Synthesegas, einer Mischung aus H<sub>2</sub> und CO, das anschließend in der seit 1925 bekannten Fischer-Tropsch Synthese zu synthetischen Kraftstoffen (Benzin, Diesel) umgesetzt werden kann. Die Herstellung des Synthesegases kann dabei durch die trockene Reformierung von CO<sub>2</sub> und Methan bzw. durch

die Umwandlung von  $\text{CO}_2$  in CO über die umgekehrte Wassergas-Shift-Reaktion erfolgen.

Bei der Herstellung von synthetischen Kraftstoffen besteht jedoch ein beträchtlicher Energieaufwand, dessen Bereitstellung durch erneuerbare Energien erfolgen muss, um eine  $\text{CO}_2$ -Reduktion gegenüber den fossilen Kraftstoffen auf Erdölbasis zu erreichen. Daher sind die Prozesse aus ökologischer Sicht nur sinnvoll, wenn der benötigte Wasserstoff aus der Wasserelektrolyse stammt, die mit erneuerbarem Strom betrieben wird. Die trockene Reformierung führt in diesem Kontext nur zu einer geringen  $\text{CO}_2$ -Reduktion. Unter der Annahme, dass der gesamte fossile Treibstoffbedarf des Transportsektors (2,5 EJ im Jahr 2014 (Kuder 2014)) in Deutschland durch synthetische Kraftstoffe in Form von Alkenen mit einem H/C-Verhältnisses von zwei gedeckt wird, könnten rein theoretisch jährlich etwa 185 Mio. t  $\text{CO}_2$  als Rohstoff eingesetzt werden.

#### 4.3 Kriterium 5: Beitrag zur Energie- und Ressourceneffizienz

Abschätzungen zur Energie- und Ressourceneffizienz liegen derzeit nicht vor.

#### 4.4 Kriterium 6: Kosteneffizienz

Eine Abschätzung der Kosteneffizienz erfordert für jedes Produkt eine detaillierte Kostenanalyse, die sowohl den heutigen als auch den zukünftigen Herstellungsprozess in den Blick nimmt. In einer Arbeit von Otto (2015) wurden für die Bulkchemikalien Methanol und Dimethylether Herstellkosten abgeschätzt. Für die Herstellung von konventionellen Methanol schätzt Otto (2015) die Kosten auf ca. 0,33 €/kg<sub>MEOH</sub>. Demgegenüber errechnet er für einen Prozess mit  $\text{CO}_2$ -Einbindung Kosten von ca. 1,1 €/kg<sub>MEOH</sub>. Die daraus resultierenden  $\text{CO}_2$ -Vermeidungskosten werden in einer Bandbreite von 500 bis 540 €/t  $\text{CO}_2$  angegeben. Eine weitere Kostenabschätzung wurde für Dimethylether vorgenommen. Für den konventionellen Herstellungsprozess gibt Otto (2015) Kosten in Höhe von 0,715 €/kg<sub>DME</sub> an. Für einen Prozess mit  $\text{CO}_2$ -Einbindung errechnet er Herstellkosten in Höhe von 1,66 bis 1,75 €/kg<sub>DME</sub>. Die damit korrelierenden Vermeidungskosten werden auf ca. 440 €/t  $\text{CO}_2$  beziffert. Generell ist darauf hinzuweisen, dass die aufwendigen Abschätzungen von einer Vielzahl von Parametern (z. B. Wasserstoffherstellkosten) abhängig sind, die einen großen Einfluss auf die Kostenermittlung haben. Die Zahlen sind daher als grobe Abschätzungen zu sehen, die einen Hinweis auf die Größenordnung der Kosten geben. Da systematische Analysen zu Vermeidungskosten für weitere Bulkchemikalien sowie insbesondere für Polymere nicht vorliegen, lassen sich keine weitere Aussagen zur Kosteneffizienz treffen.

#### 4.5 Kriterium 7: Inländische Wertschöpfung

Die Produktion von Polymeren, unterteilt nach den wichtigsten Kunststoffen, findet sich in der nachfolgenden Tab. 4-2. Der Anteil der deutschen Polymerproduktion am Weltmarkt beträgt derzeit etwa 5 bis 6 %. Eine Angabe zur inländischen Wertschöpfung, die durch die Nutzung von  $\text{CO}_2$  für die Herstellung von Bulkchemikalien sowie Polymeren ausgelöst wird, liegt derzeit nicht vor. Die Bedeutung der heutigen deutschen Polymerproduktion lässt sich an den Nettoproduktionswerten (Verband der Chemischen Industrie 2016) ablesen. Der Anteil der Polymerproduktion am gesam-

ten Produktionswert der chemisch-pharmazeutischen Industrie betrug im Jahr 2015 etwa 19,6 % (ca. 27,8 Mrd. €) und lag damit an der dritten Stelle vor der Produktion von Fein- und Spezialchemikalien mit 25,3 % (35,9 Mrd. €) und der pharmazeutischen Industrie mit 20,8 % (29,6 Mrd. €). Nach Angaben von (Verband der Chemischen Industrie, 2016) waren in der chemischen-pharmazeutischen Industrie im Jahr 2015 ca. 446.000 Menschen direkt beschäftigt. Etwa 57.500 Beschäftigte waren in der Polymerproduktionsbranche beschäftigt, was einem Anteil von ca. 12,8 % an der Gesamtbeschäftigtenzahl der chemischen-pharmazeutischen Industriebranche entspricht. Mit einem Anteil von etwa 15,4 % (ca. 27,4 Mrd. €) im Jahr 2015 trug die Polymerproduktion zum Außenhandel der chemisch-pharmazeutischen Industrie bei.

**Tab. 4-2 Polymerproduktion in Deutschland 2015**

Mt	Deutschland 2015
Polymere (Gesamt) (Wichtigste Kunststoffe)	18,5
Polyvinylchlorid (PVC)	2,8305
Polystyrol (PS)	0,962
Polypropylen (PP)	3,6445
Polyamide (PA)	1,1285
Polyethylen (PE)	5,106
Sonstige Thermoplaste	2,775
Sonstige Kunststoffe	2,0535

Quelle: *Plastics Europe (2016), Statista (2016)*

#### 4.6 Kriterium 8: Stand und Trends von F&E im internationalen Vergleich

Nach Angaben des Global CCS Institute existieren weltweit eine Vielzahl von Forschungsprojekten zur Nutzung von CO<sub>2</sub>. Eine Übersicht über abgeschlossene, laufende sowie geplante Forschungsprojekte findet sich auf der Webseite des Global CCS Institute<sup>3</sup>. In vielen dieser Projekte werden Teile oder die gesamte Wertschöpfungskette (Speicherung, Transport, Nutzung) demonstriert. Die meisten der Projekte beinhalten die physikalische Nutzung von abgeschiedenem CO<sub>2</sub> (z. B. Lebensmittelindustrie) und haben somit nur indirekt (Substitution von herkömmlich produziertem Kohlendioxid) wenig bzw. keine Relevanz für die Reduktion von Klimagasemissionen. Als weltweit aktivste Akteure sind die USA, China und Europa zu nennen. Insbesondere China misst der CO<sub>2</sub>-Nutzung größte Bedeutung zu: Die Genehmigung von chinesischen Capture-Projekten erfolgt nur bei Nachweis eines Nutzungskonzepts für das abgeschiedene CO<sub>2</sub>.

<sup>3</sup> <http://www.globalccsinstitute.com/projects>

#### 4.7 Kriterium 9: Gesellschaftliche Akzeptanz

Ob und inwieweit bei der Nutzung von CO<sub>2</sub>-basierten Produkten Akzeptanzprobleme bestehen könnten, kann zum jetzigen Zeitpunkt nicht belastend beurteilt werden, da keine ausreichende wissenschaftliche Grundlage vorliegt. Hinzuweisen ist auf ein laufendes EU-Forschungsprojekt<sup>4</sup> der RWTH Aachen (Institut für Textlinguistik und Technikkommunikation), in dem Akzeptanzanalysen zur Nutzung von Kohlestoffdioxid durchgeführt werden. Erste Ergebnisse (Zimmermann und Kant 2017) deuten darauf hin, dass der „grüne“ Fußabdruck beim Kauf nachhaltigerer Polymerprodukte eine nur geringe Rolle spielt. Darüber hinaus wird festgestellt, dass die Nachhaltigkeit von Polymerprodukten mit CO<sub>2</sub>-Nutzung oftmals in Zweifel gezogen wird. Vielmehr spielen Assoziationen, wie „toxisches CO<sub>2</sub>“ eine weitaus größere Rolle, was auf die Unwissenheit vieler Befragter hindeutet. Akzeptanzuntersuchungen (Jones et al. 2014), die zwischen Produkten bzw. Produktfamilien unterscheiden, liegen nicht ausreichender Zahl vor, so dass diesbezüglich keine detaillierteren Aussagen getroffen werden können.

#### 4.8 Kriterium 10: Unternehmerisch-technische Pfadabhängigkeit und Reaktionsfähigkeit

Inwieweit technische Pfadabhängigkeiten für die Herstellung von CO<sub>2</sub> basierten Produkten bestehen, ist derzeit nicht bekannt. Gleiches gilt für das Kriterium Reaktionsfähigkeit (z. B. Aufbau von Herstellungsanlagen).

#### 4.9 Kriterium 11: Abhängigkeit von Infrastrukturen

Die Handhabung von großen CO<sub>2</sub>-Mengen (z. B. Abscheidung von CO<sub>2</sub> aus Kraftwerken) erfordert ein Pipelinenetz, um diese zum Nutzungsstandort oder zu einem Speicherort zu transportieren. In diesem Fall wäre der Bau eines Pipelinenetzes notwendig (vgl. hierzu *Technologiefeld 2.3: CO<sub>2</sub>-Abscheidung und -Speicherung*). Bei kleineren Mengen sowie kürzeren Distanzen zum Nutzungsstandort kommen auch Logistikkonzepte wie der Transport per Lkw, Bahn und Binnenschifffahrt in Frage.

Tab. 4-3 Abhängigkeit des Technologiefeldes CO<sub>2</sub>-Nutzung von Infrastrukturen

	Ja	Nein
Die Nutzung der Technologie(n) ist <i>unabhängig</i> von Infrastrukturen möglich.	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Die Nutzung und Verbreitung der Technologie(n) ist von <i>bestehenden</i> Infrastrukturen abhängig.	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Zur Verbreitung und Nutzung der Technologie(n) müssen <i>bestehende</i> Infrastrukturen ausgebaut werden.	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Zur Verbreitung und Nutzung der Technologie(n) müssen <i>neue</i> Infrastrukturen gebaut werden.	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

<sup>4</sup> Projekt EnCO2re, <http://www.tl.rwth-aachen.de/index.php?p=enCO2re>

Je nach Fahrweise (kontinuierlicher oder diskontinuierlicher Betrieb) des jeweiligen Nutzungsprozesses besteht unter Umständen die Notwendigkeit, Kohlendioxid in kleineren Mengen zwischen zu speichern<sup>5</sup>.

#### 4.10 Kriterium 12: Systemkompatibilität

Kohlendioxid kann mit Wasserstoff direkt zu organischen Verbindungen hydriert werden. Zielprodukte sind z. B. Ameisensäure, Oxalsäure, Formaldehyd, Methanol, Ethanol sowie Dimethylether. D. h. die CO<sub>2</sub>-Nutzung zur Herstellung dieser Produkte setzt das Vorhandensein und die Verfügbarkeit von nachhaltig erzeugtem Wasserstoff voraus. Ob für die CO<sub>2</sub>-Nutzung genügend Wasserstoff bereitgestellt werden kann, hängt nicht zuletzt von der Ausgestaltung und Realisierung anderer PtX<sup>6</sup>-Pfade ab (siehe auch *Technologiefeld 4.3: Power-to-liquids/chemicals*). Da oftmals davon ausgegangen wird, dass sogenannte Stromüberschussmengen (via Elektrolyse) genutzt werden, kann eine Nutzungskonkurrenz zwischen den einzelnen Nutzungsmöglichkeiten nicht ausgeschlossen werden. Ein anderer Gesichtspunkt betrifft die Verfügbarkeit von Kohlendioxid für die chemische Nutzung. Motivation einer von erneuerbaren Energien und Energieeffizienz geprägten Energieversorgung ist die drastische Reduktion von CO<sub>2</sub>-Emissionen und damit verbunden eine niedrigere Verfügbarkeit von CO<sub>2</sub> zu Nutzungszwecken. Es ist daher davon auszugehen, dass sich die Nutzung vorzugsweise auf CO<sub>2</sub>-Emissionen konzentrieren sind, die nahezu unvermeidbar sind, wie beispielweise prozessbedingte Emissionen der Zementindustrie oder Stahl- und Eisenindustrie (siehe *Technologiefeld 2.3: CO<sub>2</sub>-Abscheidung und –Speicherung*). Für den Fall einer kompletten direkten Nutzung dieser prozessbedingten Emissionen (ca. 60 Mio. t) wäre vermutlich eine geologische Speicherung nicht mehr erforderlich, was im Sinne einer Systemkompatibilität positiv zu werten ist.

---

<sup>5</sup> Techniken hierfür sind heute bereits kommerziell verfügbar. Die heute eingesetzten Zwischenspeicher haben eine Größe von 10 bis 100 t CO<sub>2</sub>.

<sup>6</sup> PtX: Gemeint sind Nutzungsmöglichkeiten wie Power to Liquids, Power to Heat oder Power to Gas.

## 5 F&E-Empfehlungen für die öffentliche Hand

Wie bereits in der Vorgängerstudie (Wietschel et al. 2010) ausgeführt, ist die Entwicklung geeigneter Katalysatoren eine zentrale Voraussetzung für eine erfolgreiche Umsetzung von CO<sub>2</sub>. Um die Aktivierungsenergie bei der CO<sub>2</sub>-Umsetzung deutlich zu reduzieren und gleichzeitig die Reaktionsgeschwindigkeit zu erhöhen, kann das CO<sub>2</sub>-Molekül durch Koordination an Metalle aktiviert werden. Es ist auch vorteilhaft, dass CO<sub>2</sub> leicht in Bindungen zwischen Edelmetallen und anderen Molekülen invertiert.

Obwohl in der Katalyse schon viele Fortschritte erzielt wurden, besteht noch erheblicher F&E Bedarf. Dazu gilt es vor allem die Umsätze der Reaktionen zu erhöhen und Katalysatoren zu entwickeln, die auch in der Lage sind, bei niedrigen CO<sub>2</sub>-Partialdrücken und in Gegenwart von NO<sub>x</sub> und SO<sub>x</sub> hohe Selektivitäten zu erreichen und die stabiler gegen eventuelle Verunreinigungen (z. B. H<sub>2</sub>S) des eingesetzten Kohlendioxids sind.

Eine Aktivierung von CO<sub>2</sub> unter reduktiven Bedingungen ist nur unter der Einbindung von regenerativen Energien oder photokatalytischen Wegen sinnvoll (Fischedick et al. 2015). Hinsichtlich der photokatalytischen und elektrochemischen Umwandlung von CO<sub>2</sub> besteht noch ein erheblicher Bedarf an Grundlagenforschung, der Gegenstand öffentlicher F&E sein sollte.

Die Abtrennung von Wasser während der Reaktion kann helfen, zahlreiche Reaktionen von CO<sub>2</sub> mit Alkoholen zu realisieren. Dabei könnte besonders die Weiterentwicklung von Membranreaktoren einen wichtigen Beitrag leisten (Kruse et al. 2015). Ebenso könnten diese auch dabei helfen bei Reaktionen, deren thermodynamisches Gleichgewicht auf der Edukt-Seite liegt, durch gezieltes Entfernen von Produkten, die Reaktionsumsätze zu erhöhen.

Für den Großteil der in der Literatur beschriebenen CO<sub>2</sub>-Nutzungsreaktionen wurden bereits Katalysezyklen im Labormaßstab bestätigt. Für diese Reaktionen fehlen in der Regel die verfahrenstechnischen Auslegungen der Prozesse sowie deren Demonstration über den Labormaßstab hinaus.

Für Polymere (Kunststoffe), die direkt aus CO<sub>2</sub> synthetisiert werden (z. B. Polypropylencarbonat oder Polycyclohexylcarbonat) müssen noch mögliche Anwendungen intensiver erforscht werden, um genaue Mengenpotenziale für die CO<sub>2</sub>-Nutzung abzuleiten sowie das Potenzial zur CO<sub>2</sub>-Reduktion zu ermitteln. Bei anderen Polymeren, wie beispielsweise der Polyacrylsäureherstellung, sind noch substantielle Forschungsarbeiten notwendig, um den Katalysezyklus des Monomers über CO<sub>2</sub> und Ethylen zu realisieren (Kruse et al. 2015).

Technische Herausforderungen bei der Synthese von Kraftstoffen aus CO<sub>2</sub> liegen in der Katalyse und der Reaktionstechnik. Außerdem ist für die Synthese von Kraftstoffen aus CO<sub>2</sub> und Wasserstoff entscheidend, dass der eingesetzte Wasserstoff über regenerative Energie bereitgestellt wird. Dabei sind aus energetischer Sicht eine Verknüpfung mit einer zukünftigen Wasserstoffwirtschaft sowie die Wechselwirkungen mit anderen Wasserstoffanwendungen von großer Bedeutung. Für eine zukünftige wirtschaftliche Umsetzung ist eine Kostenreduktion für die Wasserstoffbereitstellung aus erneuerbaren Energien essentiell.

Unabhängig davon, ob CO<sub>2</sub> als Rohstoff für Kraftstoffe, Chemikalien oder Polymere eingesetzt wird, ist es für eine positive CO<sub>2</sub>-Bilanz ausschlaggebend, dass die eventuell benötigte Wärme oder der benötigter Strom bzw. die Reaktionspartner einen möglichst geringen „CO<sub>2</sub>-Rucksack“ aufweisen. Dies gilt vor allem, wenn konventionelle Produkte direkt durch CO<sub>2</sub>-basierte Produkte substituiert werden können. Erst durch detaillierte Lebenszyklusanalysen, mit denen heutige und zukünftige Herstellungsverfahren der Produkte detailliert in den Blick genommen werden, lassen sich belastbare Aussagen darüber treffen, ob die CO<sub>2</sub>-Bilanz in Summe verbessert bzw. wie viel Kohlendioxid eingespart werden kann.

Der beschriebene F&E-Bedarf ergänzt den bereits in der Vorstudie „Energietechnologien 2050“ beschriebenen Bedarf insbesondere um die Notwendigkeit, für die Aktivierung des Kohlendioxids verstärkt erneuerbare Energien einzusetzen, um eine positive Auswirkung auf das Klima zu erreichen. Des Weiteren ist der F&E-Bedarf um Analysen zu ergänzen, die vorab die CO<sub>2</sub>-basierte Synthese bezüglich ihrer Klimarelevanz und somit des CO<sub>2</sub>-Reduktionspotenziales gegenüber den konventionellen Prozessen/Verfahren beurteilen. Hierbei sollte auch die mögliche Fixierungsdauer von CO<sub>2</sub> berücksichtigt werden. CO<sub>2</sub>-basierte Verfahren für Stoffe zu entwickeln, die eine weltweite Produktion von wenigen Tonnen aufweisen, haben generell vernachlässigbare Auswirkungen auf das Klima und sollten bei der öffentlichen Förderung kritisch betrachtet werden. Zudem sollten CO<sub>2</sub>-basierte Produkte bereits am Anfang ihrer Entwicklung einer Umfeldanalyse unterzogen werden, um zukünftige Marktpotenziale und somit CO<sub>2</sub>-Reduktionspotenziale früh zu identifizieren bzw. abschätzen zu können.

Eine Analyse, die insbesondere für Deutschland mögliche CO<sub>2</sub>-Einsatzpotenziale für die Herstellung von Bulkchemikalien sowie Polymeren systematisch aufzeigt, existiert derzeit nicht. Ebenso fehlt eine detaillierte Kostenanalyse für die jeweiligen Bulkchemikaliientypen sowie Polymerarten.

Schlussendlich ist anzumerken, dass die theoretisch nutzbare CO<sub>2</sub>-Menge für Bulkchemikalien und Polymere auf ca. 180 Mio. t (weltweit) geschätzt wird. Bezogen auf die weltweiten CO<sub>2</sub>-Emissionen (2015: ca. 33 Mrd. t) entspricht dies einem Anteil von lediglich 0,5 %. Das EU-weite CO<sub>2</sub>-Einsatzpotenzial für Bulkchemikalien und Polymere wird derzeit auf ca. 60 Mio. t geschätzt, was einem Anteil von ca. 1,7 % an den EU weiten CO<sub>2</sub>-Emissionen (2015: 3,5 Mrd. t) entspricht. Angesichts dieser Mengenrelationen bleibt festzustellen, dass mit der CO<sub>2</sub> basierte Herstellung von Bulkchemikalien sowie Polymeren nur ein relativ kleines CO<sub>2</sub>-Reduktionspotenzial erschlossen werden kann.



## Literaturverzeichnis

- Aresta, M. (2010): Carbon Dioxide as Chemical Feedstock. Weinheim: WILEY-VCH.
- Aresta, M.; Dibenedetto, A. (2007): Utilisation of CO<sub>2</sub> as chemical feedstock: opportunities and challenges. Dalton Trans. 28 (2007) 2975-2992.
- Asahi Kasei Chemical (2013): Phosgene-free polycarbonate process.  
<http://www.asahi-kasei.co.jp/chemicals/en/license/page01.html>.
- Ausfelder, F.; Bazzanella, A. (2008): Diskussionspapier Verwertung und Speicherung von CO<sub>2</sub>: DECHEMA e.V.
- BMBF (2016a): Geförderte Projekte. <http://www.chemieundco2.de/de/157.php>.
- Boullard, O.; Leblanc, H.; Besson, B. (2000): Salicylic Acid. Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry. Wiley-VCH Verlag.
- Carbon Recycling International (2014): World's Largest CO<sub>2</sub> Methanol Plant.  
<http://www.carbonrecycling.is>. Letzter Zugriff: 10.10.2016.
- Covestro (2016): Premiere für neuen Rohstoff-Covestro startet industrielle Kunststoff-Herstellung mit CO<sub>2</sub>. <http://news.covestro.com/news.nsf/id/AAZC76-Premiere-fuer-neuen-Rohstoff>. Letzter Zugriff: 10.10.2016.
- Federsel, C.; Jackstell, R.; Beller, M. (2010): State-of-the-Art Catalysts for Hydrogenation of Carbon Dioxide. Angewandte Chemie International Edition 49 (36) 6254-6257.
- Fischedick, M.; Görner, K.; Thomeczek, M. (2015): CO<sub>2</sub>: Abtrennung, Speicherung, Nutzung. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg.
- IEA (2013): Technology Roadmap-Energy and GHG Reduction in the Chemical Industry via Catalytic Processes. Frankreich: International Energy Agency (IEA).
- Jones, C. R.; Radford, R. L.; Armstrong, K.; Styring, P. (2014): What a waste! Assessing public perceptions of Carbon Dioxide Utilisation technology. Journal of CO<sub>2</sub> Utilization 7 (2014) 51-54.
- Kember, M. R.; Buchard, A.; Williams, C. K. (2011). Catalysts for CO<sub>2</sub>/epoxide copolymerisation. Chem. Commun. 47 (2011) 141-163.
- Kruse, D.; Kiep, K.; Schäffner, B. (2015): CO<sub>2</sub>-Abtrennung und -Nutzung. In M. Fischedick, K. Görner & M. Thomeczek (Eds.): CO<sub>2</sub>: Abtrennung, Speicherung, Nutzung (Vol. 10). 511-567. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.
- Kuder, R. (2014): Energieeffizienz in der Industrie: Modellgestützte Analyse des effizienten Energieeinsatzes in der EU-27 mit Fokus auf den Industriesektor; Energy efficiency in the industrial sector : modell based analysis of the efficient use of energy in the EU-27 with focus on the industrial sector.
- Meessen, J. H. (2000): Urea. Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry. Wiley-VCH Verlag.
- Mikkelsen, M.; Jorgensen, M.; Krebs, F. C. (2010): The teraton challenge. A review of fixation and transformation of carbon dioxide. Energy & Environmental Science 3 (1) 43-81.

- Müller, T. E.; Leitner, W. (2012): Möglichkeiten der Nutzung und des Recyclings von CO<sub>2</sub>. In W. Kuckshinrichs & J.-F. Hake (Eds.), CO<sub>2</sub>-Abscheidung, -Speicherung und -Nutzung: Technische, wirtschaftliche, umweltseitige und gesellschaftliche Perspektive (Vol. 164). 69-102. Jülich: Forschungszentrum Jülich.
- Otto, A. (2015): Chemische, verfahrenstechnische und ökonomische Bewertung von Kohlendioxid als Rohstoff in der chemischen Industrie. Forschungszentrum Jülich. Energie & Umwelt 268.
- Otto, A.; Grube, T.; Schiebahn, S.; & Stolten, D. (2015): Closing the loop: captured CO<sub>2</sub> as a feedstock in the chemical industry. Energy & Environmental Science 8 (11) 3283-3297.
- Plastics Europe (2016): Plastics - the Facts 2016: PlasticsEurope.
- Quadrelli, E.; Centi, G.; Dulpan, J.-L. (2011): Carbon Dioxide Recycling: Emerging Large-Scale Technologies with Industrial Potenzial. ChemSusChem 4 (2011) 1194-1215.
- Roquette (2016): Algenfarm. <http://www.algomed.de/index.php?op=algenfarm>.  
 Letzter Zugriff: 10.10.2016.
- RWE (2016): Das RWE-Algenprojekt in Bergheim-Niederaussem.  
<https://www.rwe.de/web/cms/mediablob/de/334518/data/334512/1/magazin/2009/ausgabe-3/umweltschutz/so-schuetzt-rwe-die-umwelt/Algen-Projekt.pdf>. Letzter Zugriff: 12.10.2016.
- Sakakura, T.; Choi, J.-C.; Yasuda, H. (2007): Transformation of Carbon Dioxide. Chemical Reviews 107 (6) 2365-2387.
- Schüwer, D.; Arnold, K.; Biengen, K.; Bringezu, S.; Echternacht, L. (2015): CO<sub>2</sub> ReUse NRW-Evaluating gas sources, demand and utilization for CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub> within North Rhine-Westphalia area with respect to gas qualities.
- Sefidroudi, J. (2015): Bewertung der chemischen Nutzung von CO<sub>2</sub> als Rohstoff für die Synthese von Polymeren und Kunststoffen. Bachelorarbeit, Fachhochschule Aachen, Standort Jülich, Fachbereich Chemie und Biotechnologie, Forschungszentrum Jülich GmbH.
- Statista (2016): Anteil verschiedener Kunststoffarten an der Produktionsmenge in Deutschland in den Jahren 2013 und 2015.  
<https://de.statista.com/statistik/daten/studie/200640/umfrage/lohn-und-gehaltsanteil-am-umsatz-in-der-kunststoffverarbeitenden-industrie/>. Letzter Zugriff: 07.12.2016.
- Subitec (2016): Ausgewählte Pilotanlagen. <http://subitec.com/>. Letzter Zugriff: 12.10.2016.
- Sunfire (2016): Sunfire produziert erstmals Diesel-Kraftstoffe aus Wasser und CO<sub>2</sub>.  
<http://www.sunfire.de/de/>. Letzter Zugriff: 21.04.2015.
- Verband der Chemischen Industrie (2016): Chemiewirtschaft in Zahlen 2016. Verband der Chemischen Industrie e.V. (VCI).

Wietschel, M.; Arens, M.; Dötsch, C.; Herkel, S.; Markewitz, P.; Möst, D.; Krewitt, W. (2010). Energietechnologien 2050 - Schwerpunkte für Forschung und Entwicklung: Technologiebericht. ISI-Schriftenreihe "Innovationspotenziale" 1041.

Zimmermann, A.; Kant, M. (2017): CO<sub>2</sub> Utilisation Today - Report 2017. Bericht im Rahmen des EnCO<sub>2</sub>Re Forschungsprojekts. TU Berlin.